

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA
UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO**

‘Dissertação submetida como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica’

LUCIENE COSTA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1997

MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA UTILIZANDO TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO

Luciene Costa

‘Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de

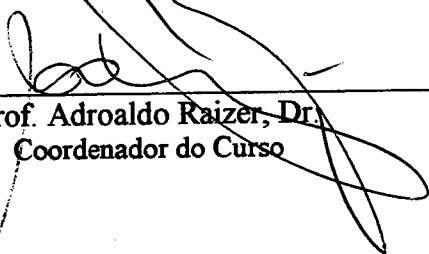
Mestre em Engenharia Elétrica

**Área de concentração em
Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica,**

e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação’



Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.
Orientador



Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora :



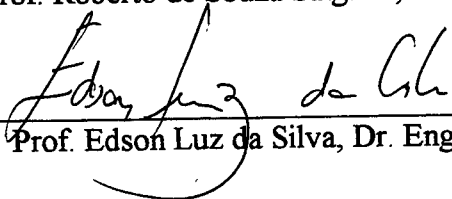
Prof. Ildemar Cassana Decker, D. Sc.
Presidente.



Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Ph. D.



Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph. D.



Prof. Edson Luz da Silva, Dr. Eng.

*Aos meus pais pelo amor,
apoio e confiança que sempre
demonstraram por mim.*

AGRADECIMENTOS

Ao professor Ildemar Cassana Decker pela paciência, dedicação, amizade e, principalmente, pela compreensão demonstrada nos momentos difíceis, tornando a orientação deste trabalho tão produtiva quanto agradável.

Aos professores da banca examinadora pelas sugestões que contribuíram à qualidade do texto da dissertação em sua forma final.

Ao apoio financeiro do CNPq.

Ao apoio dado pelo NPD ao longo deste trabalho, em especial ao amigo André.

A todos os integrantes do Labplan que me acompanharam e auxiliaram durante a realização deste trabalho, em especial as “meninas do Labplan”.

A todos os meus amigos de mestrado e doutorado pela amizade e carinho que sempre me deram.

A Maurício pelo amor, carinho e apoio durante os dois primeiros anos em que estive em Florianópolis.

E, principalmente, a minha irmã Andréa, seu marido Wilsterman e minha grande amiga Maria Cláudia, pelo carinho, amor, compreensão e força que me deram, mesmo nos momentos mais difíceis, sem os quais não seria possível terminar este trabalho.

Levo comigo lembranças e saudades de todos os momentos felizes que passei aqui, e de todas as pessoas especiais que conheci.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
NOMENCLATURA	xix
OPERADORES	xxiii
ABREVIATURAS	xxv
RESUMO	xxvii
ABSTRACT	xxix
CAPÍTULO 1 - AVALIAÇÃO E MELHORIA DA SEGURANÇA.	1
1.1. Introdução	1
1.2. Avaliação da Segurança de SEP	2
1.3. Melhoria da Segurança Dinâmica	6
1.4. Melhoria da Segurança Dinâmica Usando Otimização	8
1.5. Estrutura do Trabalho	10
CAPÍTULO 2 - ANÁLISE DA ESTABILIDADE TRANSITÓRIA E DEFINIÇÃO DE COEFICIENTES DE SENSIBILIDADE.	13
2.1. Introdução	13
2.2. O Método SLEP Iterativo	13
2.2.1. Modelo matemático utilizado	14

2.2.2. O segundo método de Liapunov.....	16
2.2.3. A função energia	19
2.2.4. A Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP	19
2.2.5. Processo iterativo de cálculo da energia crítica e tempo crítico de eliminação do defeito	21
2.3. O Critério de Áreas Iguais Estendido.....	22
2.3.1. O EEAC estático	23
2.3.1.1. Dinâmica de um sistema de n_g máquinas.....	23
2.3.1.2. Modelo equivalente agregado de duas máquinas	24
2.3.1.3. Modelo equivalente com uma máquina ligada a barra infinita	26
2.3.1.4. Aplicação do critério de áreas iguais	27
2.3.1.5. Cálculo do tempo crítico	29
2.3.1.6. Estratégias para escolha dos conjuntos críticos candidatos	31
2.3.2. O EEAC dinâmico	33
2.3.2.1. Modelo equivalente do DEEAC	33
2.3.2.2. Simulação da trajetória e OMIB equivalente	34
2.4. Margens de segurança do SLEP iterativo e do EEAC	36
2.5. Coeficientes de sensibilidade da margem de segurança usando o OMIB equivalente	39
2.6. Comentários.....	40
CAPÍTULO 3 - MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA DE SEP	43
3.1. Introdução.....	43

3.2. Metodologia Geral para a Melhoria da Segurança Dinâmica.....	44
3.3. Problemas de Otimização	45
3.4. Melhoria da Segurança Dinâmica como um Problema de Otimização	46
3.4.1. Restrições de estabilidade transitória	46
3.4.2. Restrições das limitações físicas das máquinas	47
3.4.3. Equação do balanço de potência	48
3.4.4. Função objetivo.....	48
3.4.5. A margem “Global” e a sensibilidade da segurança do sistema.....	49
3.4.6. O problema de otimização completo.....	49
3.5. Métodos de Solução já Desenvolvidos.....	51
3.5.1. O ACUCSO para a pior contingência	51
3.5.2. O ACUCSO simultâneo.....	52
3.5.2.1. Identificação das ações de controle	52
3.5.2.2. Quantificação das ações de controle.....	55
3.6. Comentários.....	56
CAPÍTULO 4 - SOLUÇÃO DO PROBLEMA DA MELHORIA DA SEGURANÇA DINÂMICA POR OTIMIZAÇÃO	59
4.1. Introdução.....	59
4.2. Classificação dos Problemas de Otimização	60
4.3. Métodos de Otimização Utilizados.....	62
4.3.1. Formulação usando programação quadrática.....	62

4.3.1.1. Função objetivo	62
4.3.1.2. Restrições	64
4.3.1.3. Formulação quadrática completa.....	66
4.3.2. Formulação usando programação linear.....	67
4.3.2.1. Função objetivo	68
4.3.2.2. Restrições	69
4.3.2.3. Formulação linear completa.....	71
4.4. Algoritmo Computacional	73
4.4.1. Sub-rotinas de otimização utilizadas na implementação.....	75
4.4.2. Características da OSL	77
4.4.2.1. A OSL paralela - OSLp.....	77
4.5. Comentários.....	78
CAPÍTULO 5 - EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS.....	81
5.1. Introdução	81
5.2. Estrutura da Implementação Computacional	82
5.3. Sistemas Elétricos.....	83
5.4. Parâmetros Utilizados nas Simulações	84
5.5. Resultados Numéricos – Fase 1.....	85
5.5.1. Aplicação da programação quadrática	87
5.5.2. Aplicação da programação linear.....	90
5.6. Resultados Numéricos – Fase 2.....	94

5.6.1. Margens finais de estabilidade.....	94
5.6.2. Geração realocada.....	97
5.6.3. Máquinas com geração alterada.....	98
5.6.4. Desempenho computacional.....	99
5.7. Comentários	105
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO	107
6.1. Introdução	107
6.2. Conclusões Gerais	108
6.3. Contribuições do Trabalho.....	109
6.4. Propostas para Trabalhos Futuros	109
APÊNDICE A - A BIBLIOTECA DE OTIMIZAÇÃO DA IBM - OSL	111
A.1. Introdução.....	109
A.2. Sistemas operacionais.....	110
A.3. Sub-rotinas de programação linear.....	110
A.4. Sub-rotinas de programação inteira-mista.....	112
A.5. Sub-rotinas de programação quadrática	114
A.6. A OSL paralela - OSLp	116
A.6.1. Benefícios do uso da OSLp.....	116
A.6.2. Sistemas operacionais.....	117
A.6.3. Software de comunicação	117
A.6.4. Terminologia do processamento paralelo	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Representação da i -ésima barra de geração	14
Figura 2.2 Trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito	19
Figura 2.3 Ilustração de como é calculada a energia e o tempo crítico no SLEP iterativo	22
Figura 2.4 Exemplo da variação do ângulo das máquinas para uma determinada contingência	24
Figura 2.5 Modelo equivalente com duas máquinas	24
Figura 2.6 Modelo equivalente máquina barra infinita	26
Figura 2.7 Ilustração do critério de áreas iguais estendido	28
Figura 2.8 Representação do procedimento que utiliza o OMIB dinâmico	35
Figura 2.9 Áreas acelerante e desacelerante do EEAC, para permanência da falta igual ao tempo da proteção e ao tempo crítico	37
Figura 3.1 Algoritmo geral conceitual de melhoria da segurança dinâmica dos SEP	44
Figura 4.1 Parábolas descritas pela equação (4.8)	65
Figura 4.2 Representação da função objetivo linear-segmentada	68
Figura 4.3 Fluxograma do algoritmo para avaliação e correção da segurança dinâmica dos SEP	75
Figura 5.1 Margens finais do Sistema Sul	95
Figura 5.2 Margens finais do Sistema 188	95
Figura 5.3 Margens finais do Sistema 730	96
Figura 5.4 Margens finais do Sistema 2000	96

Figura 5.5	Tempo total de CPU para o Sistema Sul	99
Figura 5.6	Tempo total de CPU para o Sistema 188	100
Figura 5.7	Tempo total de CPU para o Sistema 730	100
Figura 5.8	Tempo total de CPU para o Sistema 2000	100
Figura 5.9	Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de análise da estabilidade	103
Figura 5.10	Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de identificação e quantificação das ações de controle.....	103
Figura 5.11	Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de análise da estabilidade.....	104
Figura 5.12	Tempos utilizados na 1ª iteração na fase de identificação e quantificação das ações de controle.....	104
Figura A.1	Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Linear...	113
Figura A.2	Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Inteira- Mista	115
Figura A.3	Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Quadrática	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1	Parâmetros dos SEP utilizados nas simulações.....	83
Tabela 5.2	Parâmetros utilizados no SLEP.....	85
Tabela 5.3	Condição inicial das máquinas do Sistema Sul.....	86
Tabela 5.4	Dados iniciais das contingências críticas do Sistema Sul.....	86
Tabela 5.5	Redespachos obtidos para o Sistema Sul utilizando programação quadrática.....	90
Tabela 5.6	Redespachos obtidos para o Sistema Sul utilizando programação linear....	93
Tabela 5.7	Redespachos obtidos para cada sistema teste	97
Tabela 5.8	Número de máquinas com geração alterada	98
Tabela 5.9	Tempo (seg.) das etapas principais da fase de identificação e quantificação das ações de controle	102

NOMENCLATURA

β_i	- Custo incremental da i -ésima máquina;
δ_c	- Ângulo crítico de eliminação do defeito do OMIB equivalente;
δ_i	- Ângulo atrás da reatância transitória da i -ésima máquina, em relação a uma referência que gira à velocidade síncrona (rad.);
δ_o (δ_p)	- Ângulo de equilíbrio inicial (pós-defeito) do OMIB equivalente;
δ_s , δ_a	- Centro parcial de ângulos dos conjuntos S e A ;
δ_t	- Ângulo correspondente ao instante de eliminação do defeito;
δ_u	- Ângulo de equilíbrio instável na configuração pós-defeito do OMIB equivalente;
γ_s , γ_a	- Aceleração da máquina equivalente dos conjunto S e A ;
η_1 , η_2	- Margens de segurança definidas para o EEAC;
η_e	- Margem de segurança definida em termos de energia (SLEP);
η_k^o	- Margem de segurança inicial da k -ésima contingência;
η_k^r	- Margem de segurança obtida na k -ésima contingência depois do redespacho;
η_{min}	- Margem de segurança mínima para o sistema;
ϕ_{ij}	- Ângulo do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
λ	- Porcentagem de potência para cada segmento da função objetivo da programação linear;
v_i , ρ_i , μ_i , σ_i	- Inclinações dos segmentos da função objetivo da programação linear;
v_o , v_d , v_p	- Deslocamento angular da curva potência ângulo inicial, durante defeito e pós-defeito;
θ_i	- Ângulo atrás da reatância transitória da i -ésima máquina, em relação ao centro de ângulos (rad.);

ω_i	- Desvio de velocidade da i -ésima máquina em relação ao centro de ângulos (rad./s);
ξ_i	- Diferença angular da i -ésima máquina em relação ao centro parcial de ângulos;
$\Gamma_{k,i}$	- -1, se a i -ésima máquina pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência, 0 em caso contrário;
$\{M\}$	- Conjunto de contingências críticas;
$\{M_1\}$	- Conjunto de contingências críticas aumentado;
A	- Conjunto das máquinas restantes;
A_{ace}	- Área acelerante na configuração sob defeito;
A_{des}	- Área desacelerante na configuração pós-defeito;
$a_i + jb_i$	- Partes real e imaginária da corrente injetada pelo i -ésimo gerador;
B_{ij}	- Parte imaginária do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
C_1	- Conjunto de contingências em que a equação de restrição de estabilidade transitória da i -ésima contingência é representada por uma parábola convexa;
C_2	- Conjunto de contingências em que a equação de restrição de estabilidade transitória da i -ésima contingência é representada por uma parábola côncava;
C_3	- Conjunto de contingências em que a equação de restrição de estabilidade transitória da i -ésima contingência possui um radicando negativo;
CIR_{ij}	- Custo "incremental" da realocação de geração entre as máquinas i e j ;
CR_{ij}	- Custo da realocação de geração entre as máquinas i e j ;
ΔPg_{1i} e ΔPg_{2i}	- Acréscimos negativos do redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina;
ΔPg_{3i} e ΔPg_{4i}	- Acréscimos positivos do redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina;
E_c	- Energia cinética do sistema;
E_{crit}	- Energia potencial crítica total do sistema;
E_e	- Energia total do sistema no instante de eliminação do defeito;

E_i	- Tensão atrás da reatância transitória de eixo direto ($X'd_i$);
$e_i + jf_i$	- Partes real e imaginária da tensão na i -ésima máquina;
E_p	- Energia potencial do sistema;
$FCIR_{ij}$	- Fator de custo incremental da realocação entre as máquinas i e j ;
FGR_{ij}	- Fator global da realocação entre as máquinas i e j ;
FSG_{ij}	- Fator de sensibilidade da margem global pela realocação entre as máquinas i e j ;
G_{ij}	- Parte real do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
I_{Gi}	- Injeção de corrente do i -ésimo gerador;
I_{gi}	- Valor da fonte de corrente no equivalente Norton do modelo clássico das máquinas síncronas;
I_{li}	- Corrente fornecida à carga conectada à i -ésima barra;
k	- Contingência analisada;
m	- Número de contingências críticas;
M_{eq}	- Momento angular do sistema equivalente;
M_i	- Momento angular da i -ésima máquina;
MRN_i	- Margem de regulação negativa da i -ésima máquina;
MRP_i	- Margem de regulação positiva da i -ésima máquina;
M_s, M_a	- Momento de inércia dos conjunto S e A ;
M_T	- Momento angular total do sistema equivalente;
n_g	- Número de geradores (máquinas) do sistema;
$P_{c_o}, P_{c_d}, P_{c_p}$	- Potência da carga local equivalente inicial, durante defeito e pós-defeito do OMIB equivalente;
Pe_i	- Potência elétrica injetada na i -ésima barra pela i -ésima máquina;
Pe_o, Pe_d, Pe_p	- Potência elétrica equivalente inicial, durante defeito e pós-defeito do OMIB equivalente;
P_{eq}	- Potência elétrica equivalente do OMIB;
P_{gi}	- Potência ativa gerada pela i -ésima máquina;

Pg_i^o	-	Geração atual da i -ésima máquina;
$Pmax_o, Pmax_d, Pmax_p$	-	Potência elétrica máxima na configuração inicial, durante defeito e pós-defeito do OMIB;
Pm_{eq}	-	Potência mecânica equivalente do OMIB;
Pm_i	-	Potência mecânica de entrada no i -ésimo gerador (p.u.);
$Pmin_i, Pmax_i$	-	Limites de potência ativa do i -ésimo gerador;
Pm_s, Pm_a	-	Potência mecânica equivalente dos conjuntos S e A ;
S	-	Conjunto de máquinas críticas ("cluster" crítico);
SG_i	-	Sensibilidade da margem "global" em relação à variações na geração da i -ésima máquina;
SG_{ij}	-	Sensibilidade da margem global à realocação de geração entre as máquinas i e j ;
$S_{k,Pmsk}, S'_{k,Pms,k}$	-	Coefficientes de sensibilidade de primeira e segunda ordem, da margem da k -ésima contingência, em relação à potência gerada no seu conjunto crítico;
S_{Pms}, S'_{Pms}	-	Coefficientes de sensibilidade de primeira e segunda ordem da margem de segurança, em relação à potência gerada no conjunto crítico;
t_{cr}	-	Tempo crítico de eliminação do defeito;
t_{cr}^e	-	Tempo crítico calculado pelo EEEAC;
t_{slep}	-	Tempo no qual a trajetória do sistema alcança a SLEP;
Vgi	-	Tensão na i -ésima barra externa de geração;
$X'd_i$	-	Reatância transitória de eixo direto da i -ésima máquina (p.u.);
Y_{if}	-	Distância elétrica do i -ésimo gerador ao ponto de falha;
Y_{ij}	-	Módulo do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
Y_{red}	-	Matriz de admitâncias nodal da rede equivalente reduzida às barras internas das máquinas;
Zgg, Zgl, Zlg, Zll	-	Sub-matrizes da matriz de impedâncias nodais incluindo as reatâncias transitórias das máquinas e as impedâncias das cargas.

OPERADORES

- ∂ - indica derivada parcial;
- d - indica derivada total;
- \in - indica que pertence a um conjunto;
- Δ - indica variação incremental de uma grandeza;
- Σ - indica somatória de elementos;
- \dot{x} - indica derivada da variável x em relação ao tempo.

ABREVIATURAS

ACUCSO	- Ações de Controle Utilizando os Coeficientes de Sensibilidade do OMIB;
DEEAC	- “Dinamic Extended Equal Area Criterion”;
EEAC	- “Extended Equal Area Criterion”;
EMS	- “Energy Mangement System”;
OMIB	- “One Machine Infinite Bus”;
OSL	- “Optimization Subroutine Library”;
OSLp	- “Parallel Optimization Subroutine Library”;
PE	- “Parallel Environment”;
PIM	- Programação Inteira-Mista;
PL	- Programação Linear;
PQ	- Programação Quadrática;
PVM	- “Parallel Virtual Machine”;
SEEAC	- “Static Extended Equal Area Criterion”;
SEP	- Sistema Elétricos de Potência;
SLEP	- Superfície Limite de Energia Potencial;
TEF	- “Transient Energy Function”;
UEP	- “Unstabel Equilibrium Point”.

RESUMO

Nos últimos anos tem crescido o interesse pelo desenvolvimento de metodologias de avaliação da segurança dinâmica de sistemas elétricos de potência, para a aplicação nas atividades de planejamento da operação e operação em tempo real. Considerando este fato, o objetivo deste trabalho é tentar resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica dos sistemas elétricos de potência utilizando técnicas de otimização para determinar ações de controle do tipo redespacho de potência ativa.

O problema da melhoria da segurança dinâmica foi formulado em um trabalho anterior como um problema de programação não-linear visando minimizar o desvio do ponto de operação do sistema, inicialmente calculado por um programa de fluxo de potência ótimo ou despacho econômico. As soluções apresentadas basearam-se em heurística. Neste trabalho o referido problema é reescrito como um problema de programação quadrática e programação linear. Na solução foram utilizados uma aproximação do método simplex para a programação quadrática e o método dos pontos interiores para a programação linear. Para a implementação foram utilizados o programa computacional desenvolvido anteriormente e as sub-rotinas da biblioteca de otimização OSL da IBM.

A metodologia global utiliza o método SLEP iterativo na avaliação da estabilidade transitória, coeficientes de sensibilidade de primeira e segunda ordem da margem de segurança, obtidos do OMIB equivalente, para definir as equações de restrição do desempenho dinâmico do sistema e um problema de otimização para a identificação e quantificação de ações de controle do tipo redespacho de geração ativa.

Na avaliação das metodologias desenvolvidas foram utilizados quatro sistemas elétricos, sendo dois de grande porte, a fim de analisar e comparar seus desempenhos com os algoritmos implementados anteriormente utilizando heurística. Os resultados encontrados validaram a metodologia desenvolvida e mostraram que o uso das técnicas de otimização na solução do problema resulta em melhores resultados que os obtidos utilizando heurística.

ABSTRACT

In the last years the interest by the development of dynamic security assessment methodologies in electrical power systems has increased, aiming the application to problems of operation planning and real time operation. Taking it into account, this work proposes the solution of the problem of dynamic security improvement in electrical power systems, utilising optimization techniques for determining control actions such as active power rescheduling.

This problem was formulated in a previous work as a problem of non-linear programming, searching the minimization of deviation of the system operation point, which was initially calculated by an optimal power flow program. The presented solutions in that work were based on heuristics. On the other hand, in this work, this problem is formulated as a problem of both quadratic and linear programming.

The solution of this problem is obtained considering an approach based on the simplex method for the quadratic programming and the interior-point method for the linear programming. The implementation involved the program developed previously and the sub-routines of IBM optimization library (OSL) as well.

The global methodology utilizes the iterative SLEP method for valuation transient stability analysis, sensibility coefficients of first and second order of security margin, which are obtained from the equivalent OMIB, for defining the constraint equations of the dynamic performance of the system as well as an optimization problem for identification and quantification of control actions such as active power rescheduling.

The validation of these methodologies involved the consideration of four electrical test systems, including two bulk systems. The main purpose of this step was to analyse and to compare these results to the ones obtained with the algorithm which considers heuristics. The obtained results have proved that this methodology supplies better results than the algorithm which takes into its account only heuristics.

CAPÍTULO 1

Avaliação e Melhoria da Segurança Dinâmica

1.1. Introdução

Nas últimas décadas tem sido testemunhado um grande desenvolvimento nos sistemas de produção de energia. Em particular, sistemas elétricos de potência (SEP) tem experimentado um contínuo aumento em suas dimensões, número de interligações, carregamento nas linhas de transmissão, e outros fatores [40], induzindo as empresas do setor à procura de um melhor aproveitamento das linhas de transmissão e recursos de geração. Como resultado, os sistemas elétricos de potência tendem a operar cada vez mais próximos de seus limites máximos e pequenos distúrbios podem levar a severas consequências para a integridade dos mesmos. Estes fatores tem resultado em um grande interesse pelo desenvolvimento e utilização de metodologias precisas e rápidas de avaliação da segurança no âmbito dos sistemas de gerência de energia (EMS – “Energy Management System”).

A segurança em SEP pode ser definida como uma medida da habilidade do sistema em suportar, sem sérias consequências, qualquer uma das contingências de uma lista pré-selecionada [37].

Nos EMS um dos objetivos, na operação dos sistemas elétricos de potência, é manter os fluxos de potência e a magnitude de tensão e o ângulo das barras dentro de limites aceitáveis, mesmo sob significativas mudanças na carga ou nos recursos disponíveis.

A operação segura dos sistemas de potência requer a capacidade para a análise de inúmeras configurações do sistema e condições de operação, nos estados transitórios e estáticos, dentro de um razoável tempo decorrido. Informações confiáveis da configuração e das condições e requisitos de operação são fundamentais para o operador requerer a análise de estabilidade transitória do sistema, com respeito a uma lista de contingências selecionadas, a pequenos intervalos de tempo, utilizando dados “on-line” [39].

No planejamento da operação de médio e curto prazos (“off-line”) são empregadas configurações da rede normais, usualmente considerando todas as linhas de transmissão disponíveis e despachos de geração típicos, supondo uma disponibilidade média. Quando as condições reais de operação diferem daquelas com as quais foram fixados os limites, a segurança do sistema pode ficar comprometida.

A avaliação e correção da segurança dinâmica dos sistemas elétricos de potência, empregando ferramentas rápidas e automáticas, é uma das funções que se deve dispor nos sistema de gerência de energia para fazer o planejamento da operação de curto e muito curto prazos, conforme as necessidades do momento. Esta preocupação tem levado diversos pesquisadores a desenvolver novas metodologias para suprir estas necessidades. Nos demais itens deste capítulo apresenta-se uma abordagem sucinta relativa à avaliação da segurança de SEP, a melhoria da segurança dinâmica e a melhoria da segurança dinâmica usando otimização. Por último é apresentada a estrutura deste trabalho.

1.2. Avaliação da Segurança de SEP

A avaliação da segurança dos SEP é dividida em análise estática e análise dinâmica. Na análise de segurança estática as restrições operativas que se deseja monitorar referem-se à sobrecargas em equipamentos (transformadores e linhas de transmissão) e verificação de limites de tensão em barramentos. A análise da segurança estática é feita a partir de cálculos em regime permanente, nos quais as condições de

regime pós-contingências são obtidas e usadas para verificar possíveis violações dos limites de fluxos ou tensões. Isso significa que a dinâmica do sistema é ignorada, não permitindo saber se o estado de pós-contingência seria alcançado sem perda de sincronismo em parte do sistema. A ferramenta computacional básica utilizada na análise estática é um programa de fluxo de potência e mais recentemente os programas de fluxo de potência ótimo.

Na análise de segurança dinâmica o que se deseja saber primordialmente é se o sistema elétrico irá atingir um ponto de operação que seja aceitável, após a ocorrência de uma contingência (desligamento de linha, curto-circuito, etc.). Analisa-se o transitório eletromecânico das máquinas síncronas a fim de verificar a estabilidade do sistema, ou seja, se o sincronismo tende a ser mantido ou se o sistema ficará instável.

A estabilidade pode ser classificada em dois tipos: estabilidade a pequenas perturbações e estabilidade a grandes perturbações, conhecida também como estabilidade transitória [36]. O estudo da estabilidade a pequenas perturbações permite que o SEP possa ser descrito por um conjunto de equações diferenciais e algébricas lineares, obtidas a partir da linearização do modelo matemático original em torno de um ponto de operação. Consequentemente, o estudo da estabilidade pode ser feito usando técnicas de sistemas lineares. Na estabilidade a grandes perturbações, ou estabilidade transitória, o sistema é representado por um conjunto de equações diferenciais e algébricas não-lineares.

A análise da estabilidade transitória é feita tradicionalmente utilizando programas de simulação no tempo, os quais permitem a modelagem detalhada de todos os elementos do sistema e fornecem resultados confiáveis. Porém, o esforço computacional requerido e a quantidade de curvas para serem analisadas é muito grande devido à quantidade de contingências que devem ser analisadas, além das diferentes condições de carregamento do sistema e possíveis mudanças na topologia da rede. Na maioria dos casos é inviável a utilização das metodologias tradicionais na avaliação e na melhoria da segurança dinâmica em atividades de planejamento da operação.

Procurando meios rápidos e eficazes para a análise da estabilidade transitória, foram desenvolvidos novos algoritmos nas últimas décadas. Fouad e Stanton em [26] apresentam o uso do método da função de energia transitória (TEF - "Transient

Energy Function”) para a avaliação da estabilidade. A idéia proposta consiste em calcular a energia transitória total do sistema ao final do período sob defeito e comparar seu valor com uma energia potencial crítica do sistema. Essa energia crítica corresponde a energia potencial do sistema no ponto de equilíbrio instável (UEP – “Unstable Equilibrium Point”) de controle, associado as máquinas que perdem o sincronismo. A diferença entre os valores da energia total e a energia crítica é denominada margem de energia transitória. A principal dificuldade do método está na identificação precisa e a priori do UEP de controle.

Vários métodos foram desenvolvidos utilizando o conceito da Superfície Limite de Energia Potencial (SLEP) [11,16,25,27] e a TEF. Em [25,27], na determinação dos tempos críticos, utilizou-se como energia crítica o valor da energia potencial do sistema no instante de cruzamento da trajetória do sistema com defeito mantido e a SLEP. Em [11,16] este procedimento foi aprimorado e definido como SLEP iterativo, pois identifica as trajetórias estáveis e instáveis dentro de um processo iterativo de cálculo de tempos críticos. Inicialmente são determinadas duas estimativas para a energia crítica, uma otimista e outra pessimista. A partir destas estimativas é realizado um processo iterativo no sentido de diminuir a diferença de valor entre elas, até que seja atendida uma tolerância pré-especificada. A energia crítica para a contingência sob análise será a última estimativa obtida. As principais vantagens deste método estão na precisão dos resultados, na manutenção da identidade da rede elétrica, não reduzindo-a às barras internas de geração, e o fato de não necessitar da identificação e cálculo de pontos de equilíbrio instáveis.

A função da energia transitória, TEF, é novamente utilizada por Maria et alli em [28], junto com a simulação tradicional no domínio do tempo, denominado assim de Método Híbrido. O método apresenta a vantagem de considerar modelos mais sofisticados para os componentes do sistema. Por outro lado, o esforço computacional é elevado e os valores de margem em energia são muito imprecisos em geral.

Mansour et alli em [30] desenvolvem um método, baseado em simulações no tempo, para determinar a margem de energia transitória. Este método, denominado de “Second Kick”, simula uma segunda falta capaz de provocar a perda de sincronismo do sistema. Para calcular a margem de energia transitória é utilizada a energia cinética do

ponto de cruzamento com a SLEP e a energia do sistema depois de removida a segunda falta. Se o sistema for instável para a primeira falta, a margem de energia transitória é calculada utilizando o valor da energia cinética de cruzamento com a SLEP. Neste método não se tem limitações na modelagem detalhada do sistema, porém o tempo de permanência da segunda falta deve ser adaptado para cada sistema particular e mudanças no modo de oscilação do sistema podem provocar estimativas pouco precisas da margem. Outro fato é que as máquinas críticas formam parte dos dados definidos para cada contingência, com a conseqüente perda de generalidade do método.

Vaahedi et alli em [33] abordam dois novos métodos originados do “Second Kick”, o Kiana e o Fast Second Kick. No primeiro uma série de pequenas faltas são aplicadas e o ponto de cruzamento com a SLEP é identificado pela monitoração dos valores durante a instabilidade. No Fast Second Kick, o limite de estabilidade transitória é obtido pela repetição de poucas iterações até o caso crítico onde a margem de energia é zero. Estes dois novos métodos levam aos mesmos resultados finais obtidos utilizando o Second Kick. Em relação ao tempo de processamento, o Fast Second Kick é duas vezes mais rápido e o Kiana é três vezes mais lento comparados com o Second Kick.

Muitos trabalhos foram desenvolvidos [3-6,9] utilizando o critério de áreas iguais estendido (EEAC - “Extended Equal Area Criterion”). A idéia é transformar um sistema multimáquinas, a partir da definição de centro de ângulo, em um sistema equivalente com duas máquinas, uma representando o conjunto das máquinas críticas e a outra o conjunto das máquinas restantes. Posteriormente, o sistema é reduzido a um sistema de uma única máquina equivalente ligada a barra infinita (OMIB - “One Machine Infinite Bus”), para assim aplicar o clássico critério de áreas iguais. Este método foi denominado de EEAC estático (SEEAC - “Static Extended Equal Area Criterion”). No sentido de melhorar a precisão do EEAC estático, é proposto em [7,8] o EEAC dinâmico (DEEAC - “Dynamic Extended Equal Area Criterion”). As principais mudanças se devem à consideração das diferenças angulares entre as máquinas de cada conjunto e o recálculo dos parâmetros do OMIB durante o transitório e em intervalos de tempo previamente definidos.

A principal vantagem do EEAC é obter expressões analíticas simples para representar a margem de segurança de cada contingência. A correta identificação das

máquinas críticas é ainda o principal problema a ser resolvido, implicando em dificuldades na precisão dos resultados.

Zhang et alli em [31] apresentam uma evolução do EEAC que deu origem ao método denominado SIME - “Single Machine Equivalent”. A melhoria deste método em relação ao EEAC é que no EEAC é utilizado o modelo clássico simplificado para representar os componentes do sistema e os ângulos das máquinas são aqueles obtidos em t_0 , ou seja, no início do distúrbio. Em contraste, o SIME considera a evolução no tempo de cada parâmetro das máquinas (ângulo, velocidade, potências, etc.) e pode ser utilizado em qualquer modelagem de sistemas de potência. Como no EEAC, a identificação do conjunto de máquinas críticas continua sendo ainda o principal problema deste método. Neste mesmo trabalho é apresentado uma ferramenta computacionalmente rápida utilizada para selecionar as contingências mais severas do sistema, denominada “filtro SIME”.

1.3. Melhoria da Segurança Dinâmica

Na avaliação da segurança dinâmica, um sistema é considerado inseguro se pelo menos uma contingência puder levar um ou mais geradores à perda do sincronismo. Assim, nos estudos de segurança dinâmica são considerados em geral um conjunto de contingências com o propósito de verificar como está o nível de segurança do sistema. Isto inclui a obtenção de margens ou índices de estabilidade ou instabilidade, dependendo da situação.

Se for detectado que o sistema está inseguro, devem ser definidas ações corretivas para torná-lo seguro. Caso contrário, serão determinadas ações preventivas para evitar que o sistema se torne inseguro. As ações corretivas/preventivas tem como finalidade a melhoria do nível da segurança dinâmica e devem contemplar basicamente os seguintes passos:

- Estabelecer um valor mínimo para a margem de segurança;
- Avaliar a segurança do sistema identificando as contingências que não satisfazem o nível mínimo de segurança requerido;
- Identificar e quantificar ações de controle para obter uma condição segura sempre que necessário.

Considerando estes aspectos, várias metodologias para melhorar as condições de segurança dos sistemas tem sido propostas. Fonseca e Pedroso em [22] desenvolveram um método denominado de Direção S para a correção da segurança a partir de redespachos de geração ativa, aumentando a margem da contingência com menor valor de margem em energia. Foi definido uma direção viável ou direção S , obtida a partir do ponto de equilíbrio estável pós-falta e do ponto de tangência da trajetória crítica pós-falta com a superfície SLEP.

Kuo e Bose em [29] propõem uma metodologia de redespacho de segurança, baseada na conjectura de que ao se melhorar a coerência na oscilação das máquinas é possível aumentar o tempo crítico e a margem de segurança. O método TEF é utilizado para avaliar a estabilidade transitória. O redespacho é calculado para a contingência com menor margem, procurando que cada máquina possua a mesma taxa de variação da velocidade no instante de eliminação da falta.

Devido ao crescimento da complexidade e dimensão dos sistemas elétricos, o uso de ferramentas computacionais rápidas torna-se cada vez mais importante. Pensando nisto, CASTRO em [32] investiga a possibilidade de resolver os subproblemas de cálculo da estabilidade transitória e avaliação da segurança utilizando sistemas de computação distribuída.

Em [34], Ota et alli apresentam o Sistema de Controle de Estabilidade Transitória (Sistema TSC - "Transient Stability Control System") baseado em cálculos de estabilidade "on-line". O Sistema TSC corrige a segurança do sistema a partir de redespachos de geração que são determinados por um estudo detalhado da estabilidade baseado em informações "on-line" de uma rede real. Para este estudo detalhado é utilizado o processamento paralelo que reduz consideravelmente o tempo computacional.

As técnicas de processamento paralelo foram novamente utilizadas por La Scala em [38]. A metodologia descrita consiste em utilizar as técnicas de processamento paralelo para a análise da estabilidade transitória, objetivando solucionar o problema da avaliação da segurança “on-line”. Foi assumido que a análise dinâmica de contingências fosse repetida a cada 15 minutos. Durante este período de tempo as condições de carga e configurações do sistema podem alterar significativamente, porém não drasticamente. A idéia básica consiste em assumir que um conjunto de relevantes contingências permaneçam as mesmas entre dois ciclos associados com a avaliação da segurança dinâmica.

Em geral têm-se mais de uma solução para o problema de melhoria da segurança dinâmica. Neste sentido, as técnicas de otimização tem sido utilizadas com o objetivo de encontrar a melhor solução para a melhoria da segurança do sistema, considerando custo de operação, limites dos equipamentos e outros aspectos. No próximo item abordaremos o uso da otimização na melhoria da segurança dinâmica.

1.4. Melhoria da Segurança Dinâmica Usando Otimização

Nos EMS a procura por uma condição de operação ótima, que satisfaça não apenas as condições de segurança do sistema, torna-se cada vez mais importante. No despacho econômico, por exemplo, fatores econômicos são levados em consideração buscando determinar a quantidade de potência ativa que cada gerador do sistema deve produzir, tal que o custo total de geração seja minimizado, e a demanda assim como as restrições operacionais sejam satisfeitas. A fim de considerar todos esses fatores, tem-se procurado utilizar o fluxo de potência ótimo (FPO).

O FPO consiste em calcular a distribuição de potências ativa e reativa que otimize determinados índices de desempenho, satisfazendo os balanços de potências ativa e reativa em cada barra e todas as restrições operacionais (limites de tensão, taps, fluxos de potência nos circuitos, etc.). Estes índices de desempenho, normalmente, referem-se

ao custo, segurança e/ou qualidade de serviço. Entretanto, o fluxo de potência ótimo ainda se mantém restrito as condições de operação em regime permanente, embora possa considerar as restrições de segurança estáticas do sistema. Atualmente, não há ainda nenhuma aplicação de FPO que leve em consideração as restrições de segurança dinâmica do sistema. Por outro lado, algumas tentativas de formular o problema da melhoria da segurança dinâmica como um problema de otimização são encontradas na literatura.

Em [14,23] é apresentado uma nova metodologia para a correção da segurança dinâmica. Desenvolveu-se um algoritmo através do uso da análise de sensibilidade da margem de energia e método de otimização, buscando um mínimo deslocamento do ponto de equilíbrio do sistema. O modelo proposto foi resolvido como um problema convencional de análise de segurança via critérios estáticos, incluindo apenas novas restrições ao problema, relativas à estabilidade transitória.

Em [1] é abordada uma nova metodologia denominada ACUCSO (Ações de Controle Utilizando os Coeficientes de Sensibilidade do OMIB), desenvolvida para fazer um redespacho de geração ativa, aproveitando as características de precisão e confiabilidade do método SLEP (Superfície Limite de Energia Potencial) iterativo e as expressões analíticas dos coeficientes de sensibilidade da margem de segurança, obtidos do OMIB (“One Machine Infinite Bus”) equivalente. O problema da melhoria da segurança dinâmica foi formulado como um problema de otimização e resolvido a partir de dois algoritmos heurísticos, iterativos e automáticos. Um desses algoritmos, denominado ACUCSO Simultâneo, considera de forma explícita, a otimização do sistema e a interação entre as contingências.

Recentemente, La Scala et alli em [35] apresentam uma metodologia, baseada em técnicas de programação não-linear, para avaliar as ações de controle para garantir a segurança dinâmica de sistemas de potência. A idéia proposta é que o controle preventivo dinâmico “on-line” pode ser formulado como um problema de otimização estática. A função objetivo utilizada representa o custo de produção, as restrições de igualdade consistem em uma discretização do sistema algébrico-diferencial que descreve a dinâmica do sistema, e as restrições de desigualdade definem um domínio onde a trajetória do sistema deve satisfazer os requerimentos de desempenho do sistema

(estabilidade, perfil de tensão, etc.). As ações de controle são do tipo redespacho de geração e os testes foram feitos considerando redespacho de potência ativa e reativa.

No presente trabalho o problema de melhoria da segurança dinâmica, formulado em [1] como um problema de otimização do tipo programação não-linear, será resolvido utilizando técnicas de métodos numéricos de otimização. O problema de otimização tem como objetivo minimizar o desvio do ponto de operação a partir dos redespachos de geração de potência ativa, levando o sistema para uma nova condição que satisfaça as restrições de estabilidade transitória e as limitações físicas dos equipamentos.

Na metodologia desenvolvida o problema da melhoria da segurança foi formulado utilizando duas técnicas diferentes de otimização: programação quadrática e programação linear. Para isso houve a necessidade de pequenas alterações na formulação original do problema [1], tanto na função objetivo quanto nas restrições. Com os algoritmos implementados foram realizadas simulações utilizando quatro sistemas elétricos de testes, de pequeno e grande porte, a fim de se validar as metodologias e comparar o seus desempenhos com os algoritmos implementados anteriormente [1] utilizando heurística.

1.5. Estrutura do Trabalho

O trabalho encontra-se organizado da seguinte forma: no capítulo 2 são apresentados os métodos de análise rápida da estabilidade transitória, abrangendo o método SLEP iterativo e o critério de áreas iguais estendido estático (SEEAC) e dinâmico (DEEAC). São mencionados também as definições do OMIB equivalente, margem de segurança e coeficientes de sensibilidade da margem de segurança. No capítulo 3 é apresentado o problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado como um problema de otimização e as soluções implementadas anteriormente utilizando heurística. No capítulo 4 encontram-se as soluções desenvolvidas para resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica a partir das técnicas de otimização e as

ferramentas utilizadas para sua implementação. Os teste computacionais e os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, onde são analisados todos os aspectos relacionados com o desempenho dos novos algoritmos, comparando-os com os algoritmos desenvolvidos utilizando heurística. Finalmente no capítulo 6 são apresentadas as conclusões gerais, contribuições do trabalho e propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Análise da Estabilidade Transitória e Definição de Coeficientes de Sensibilidade

2.1. Introdução

Neste capítulo é apresentada uma síntese das metodologias de análise rápida da estabilidade transitória dos sistemas elétricos de potência (SEP), SLEP iterativo e critério de áreas iguais estendido estático (SEEAC) e dinâmico (DEEAC). Adicionalmente, são apresentadas as definições do OMIB (“One Machine Infinite Bus”) equivalente, margem de segurança e coeficientes de sensibilidade da margem de segurança.

2.2. O Método SLEP Iterativo

O método SLEP iterativo é um algoritmo desenvolvido para a determinação da energia potencial crítica e correspondente tempo crítico de cada contingência, utilizando o conceito de superfície limite de energia potencial (SLEP) e o cálculo de trajetórias estáveis e instáveis do sistema.

Na apresentação sucinta do método SLEP iterativo será dado um destaque maior aos conceitos e à modelagem na qual está baseado o método, isto é, a preservação da identidade da rede elétrica, a utilização do segundo método de Liapunov

mediante a definição da função energia total do sistema, a superfície limite de energia potencial e a forma como é estabelecido o processo iterativo de cálculo de tempos críticos.

2.2.1. Modelo matemático utilizado

O SEP é descrito pelo modelo clássico, ou seja, os geradores são representados por uma fonte de tensão constante em série com a respectiva reatância transitória de eixo direto (X'_d), os torques de amortecimento são desprezados e as cargas são consideradas como impedâncias constantes. Contudo, a identidade da rede elétrica é preservada, não reduzindo-a às barras internas de geração. Deste modo, uma barra genérica de geração pode ser representada como mostra a Figura 2.1.

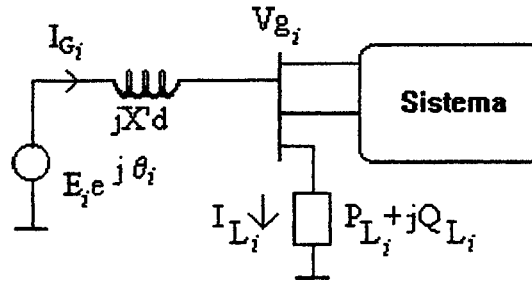


Figura 2.1 Representação da i -ésima barra de geração
onde:

P_{L_i}, Q_{L_i} : Potências ativa e reativa da carga na i -ésima barra;

$E_i e^{j\theta_i}$: tensão atrás da reatância transitória do i -ésimo gerador;

$V_{G_i} = e_i + jf_i$: tensão na i -ésima barra externa de geração;

$I_{G_i} = a_i + jb_i$: injeção de corrente do i -ésimo gerador;

$I_{L_i} = c_i + jd_i$: corrente fornecida à carga conectada à i -ésima barra.

Com as considerações estabelecidas e admitindo-se o centro de ângulos como referência de movimento, as equações que descrevem a dinâmica dos n_g geradores [16] são:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\omega_i}{dt} = Pm_i - Pg_i - \frac{M_i}{M_T} P_C \triangleq g_i(\theta) \\ \frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n_g \quad (2.1)$$

onde:

$$Pg_i = E_i B_i (-f_i \cos \theta_i + e_i \sin \theta_i)$$

$$B_i = 1 / X' d_i$$

$$P_C = \sum_{i=1}^{n_g} (Pm_i - Pg_i)$$

$$M_T = \sum_{i=1}^{n_g} M_i$$

$$Ig_i = E_i B_i (\sin \theta_i - j \cos \theta_i)$$

$$\begin{bmatrix} Vg \\ V_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{gg} & Z_{gl} \\ Z_{lg} & Z_{ll} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ig \\ 0 \end{bmatrix}$$

- t - tempo (seg.);
- θ_i - ângulo atrás da reatância transitória da i -ésima máquina em relação ao centro de ângulos (rad.);
- ω_i - desvio de velocidade do rotor da i -ésima máquina em relação ao centro de ângulos;
- M_i - momento angular da i -ésima máquina (seg./rad. elétricos);
- Ig_i - valor da fonte de corrente no equivalente Norton do modelo clássico das máquinas síncronas,
- Pm_i - potência mecânica de entrada no i -ésimo gerador (p.u.);
- Pg_i - potência elétrica injetada pelo i -ésimo gerador (p.u.);
- $X'd_i$ - reatância transitória de eixo direto da i -ésima máquina;
- $Z_{gg}, Z_{gl}, Z_{lg}, Z_{ll}$ - sub-matrizes da matriz de impedâncias nodais incluindo as reatâncias transitórias das máquinas e as impedâncias das cargas.

O modelo utilizado preserva a identidade das cargas e da rede, o que implica na representação do sistema por dois conjuntos de equações não-lineares, diferenciais ordinárias de primeira ordem e algébricas, descritas por:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, y) \\ 0 &= g(x, y) \end{aligned} \tag{2.2}$$

A determinação das potências P_{g_i} , $i=1,2,\dots,n_g$, ao longo do cálculo de trajetórias do sistema, requer a determinação de $V_{g_i}=e_i+jf_i$ ($i=1,2,\dots,n_g$) e conseqüentemente da sub-matriz Z_{gg} . Por isso, os elementos de Z_{gg} são obtidos explicitamente a fim de permitir que as tensões e suas derivadas, empregadas no cálculo das trajetórias do sistema usando série de Taylor, possam ser representadas por funções analíticas. O método da compensação é utilizado no cálculo dos elementos de Z_{gg} , para as configurações do sistema durante e pós-falta.

2.2.2. O segundo método de Liapunov

Os modelos matemáticos para análise de estabilidade transitória podem ser descritos genericamente pela seguinte equação:

$$\dot{X} = f(X) \quad ; \quad f(0) = 0 \quad (2.3)$$

onde:

0 : estado de equilíbrio do sistema;

X : vetor de estados de dimensão n ($X \in \mathbb{R}^n$);

t : variável independente (tempo);

$f(X)$: função vetorial não linear ($f(.) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$).

Para analisar a estabilidade de sistemas descritos pela equação (2.3), utilizando o segundo método de Liapunov, deve ser definida uma função escalar $V(X)$, com as seguintes propriedades:

- i. $V(X) > 0$; $X \neq 0$, $X \in D$
- ii. $V(X) = 0$; $X = 0$, $0 \in D$
- iii. $\dot{V}(X) < 0$; $X \neq 0$, $X \in D$
- iv. $\dot{V}(X) = 0$; $X = 0$

onde:

V - função de Liapunov

X - vetor de estados do sistema

D - subconjunto do \mathcal{R}^n que contém a origem em seu interior, aberto e convexo

\dot{V} - derivada de V ao longo das trajetórias do sistema (2.3).

$$\dot{V} = \frac{dV}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial X_i} \frac{dX_i}{dt} = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial X_i} f_i(X)$$

As condições *i* e *ii* indicam que a função $V(X)$ deve ser positiva-definida em um conjunto $D \subset \mathcal{R}^n$, e as condições *iii* e *iv* que sua derivada $\dot{V}(X)$, seja negativa-definida neste mesmo conjunto [16].

A utilização do segundo método de Liapunov para sistemas lineares, na análise da estabilidade assintótica do estado de equilíbrio, implica que todos os movimentos sempre conduzem para o estado de equilíbrio, independentemente da condição inicial. Isto não é verdadeiro para a dinâmica de sistemas não-lineares, e resultados conservativos são obtidos quando é utilizado o segundo método de Liapunov na análise de estabilidade transitória em SEP [11], devido à consideração apenas da configuração do sistema pós-defeito.

No sentido de suportar as considerações de aspectos físicos e práticos no método de Liapunov, os quais procuram a obtenção de resultados menos conservativos e a consideração da dinâmica do sistema sob defeito, foi definida [16] uma região de atração em um conjunto invariante e em torno do estado de equilíbrio, tal que os movimentos iniciados nesta região convergem para o ponto de equilíbrio.

Apresenta-se a seguir a definição de conjunto invariante e o teorema que fundamenta a utilização da teoria de Liapunov [16].

Conjunto invariante : Seja o sistema definido por:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X), \quad X(0) = X_0 \\ X(t) &\in \mathcal{R}^n \end{aligned} \tag{2.4}$$

O conjunto Ω é chamado invariante em relação ao sistema (2.4), se para qualquer X_0 em Ω , existe um t_0 tal que o movimento $X(t ; X_0, t_0)$ pertence a Ω para

todo $t \geq t_0$. Desta forma, toda trajetória (movimento) do sistema é um conjunto invariante, assim como também o seu estado de equilíbrio X^e .

Teorema 2.2.1 : Seja Ω um conjunto invariante para o sistema (2.4). Considere $X^e \in \Omega$ e $V(X - X^e)$ ser uma função de valor real, definida em Ω com $V(0)=0$. Seja $S(k)$ o conjunto definido como:

$$S(k) = \{X \in \Omega / V(X - X^e) < k\}$$

supõe-se para algum $k_0 > 0$ que

- i. $V(X - X^e)$ é positiva-definida e crescente em $S(k_0)$, e
- ii. $\dot{V}(X - X^e)$ é negativa-definida em $S(k_0)$.

Então, X^e é um estado de equilíbrio do sistema (2.4) e o conjunto $S(k_0)$ está no domínio de atração de X^e .

Para ilustrar a aplicação conceitual do teorema (2.2.1), na Figura 2.2 são apresentadas as trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito [16].

A linha cheia representa a trajetória do sistema com o defeito mantido. O ponto assinalado por t_{cr}^* é denominado de tempo crítico de eliminação do defeito. As trajetórias S_1, S_2, \dots, S_n são estáveis, enquanto que as U_1, U_2 são instáveis. O ponto X^u identifica o estado de equilíbrio instável pós-defeito mais próximo do ponto de cruzamento com a superfície SLEP.

Definindo Ω como a união de todas as trajetórias pós-defeito, mais o ponto de equilíbrio estável pós-defeito (X^e), e considerando-se $V(X - X^e)$ ser a função energia, o valor de k_0 no teorema (2.2.1) corresponde ao maior valor de $V(X - X^e)$ adquirido pelo sistema sob defeito, capaz de permitir que as condições *i* e *ii* sejam satisfeitas.

Com esse valor de k_0 , pode-se determinar o tempo crítico de eliminação do defeito (t_{cr}^*). Então o cálculo do valor de energia k_0 , para uma determinada contingência, torna-se a questão central do problema.

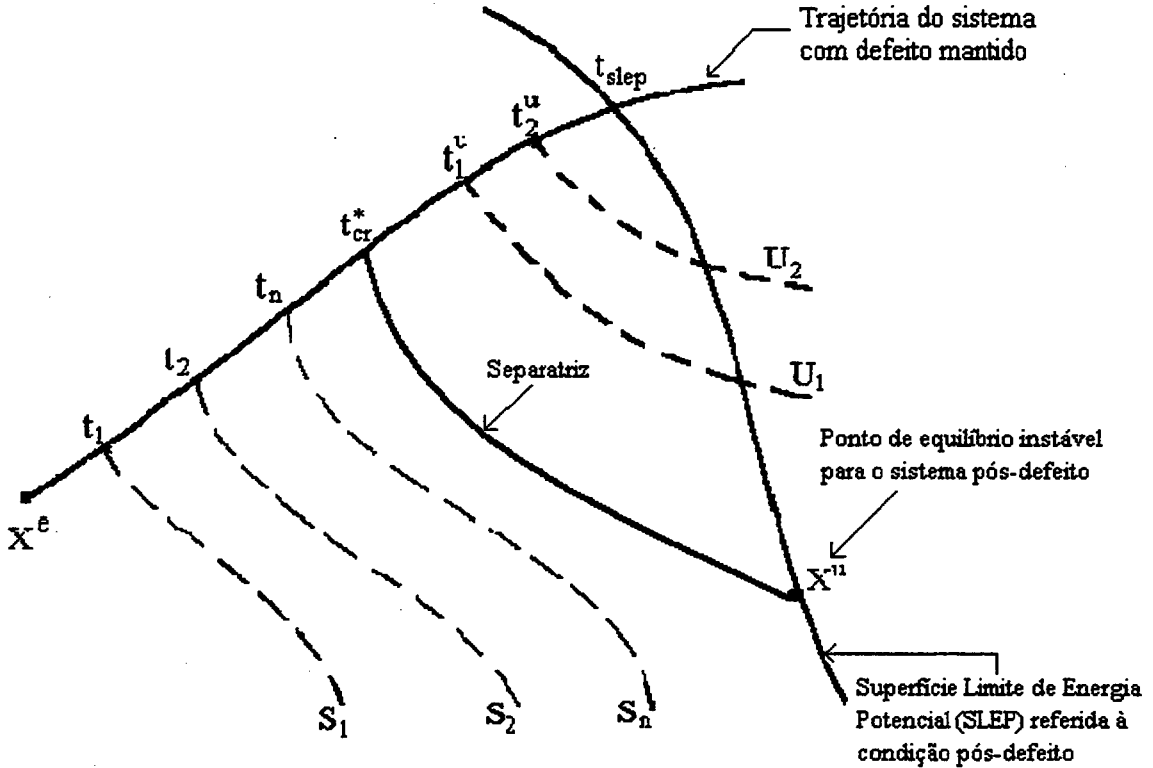


Figura 2.2 Trajetórias de um sistema hipotético para vários tempos de eliminação do defeito

2.2.3. A função energia

No método SLEP iterativo [16] emprega-se a função que representa a energia total do sistema como função de Liapunov, definida como:

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_g} M_i \omega_i^2 - \sum_{i=1}^{n_g} \int_{\theta_i^e}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i \quad (2.5)$$

que simbolicamente pode ser representada por:

$$V(\theta, \omega) = Ec(\omega) + Ep(\theta) \quad (2.6)$$

onde Ec e Ep representam, respectivamente, a energia cinética e a energia potencial do sistema (2.1).

2.2.4. A Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP

Seja θ^e o estado de equilíbrio pós-falta do sistema estável no sentido de Liapunov e θ um vetor do sub-espço de estado dos ângulos. Considerando os raios tirados de θ^e

$$\theta^1 = \theta^e + \lambda \mu, \quad \lambda \in \mathbb{R}, \quad \lambda \geq 0 \quad \text{e}$$

$$\mu = \frac{\theta^1 - \theta^e}{\|\theta^1 - \theta^e\|}$$

a SLEP é definida em [16] como sendo o conjunto $S: \{\theta / \theta = \theta^e + \lambda^* \mu\}$,

onde:

$$\lambda^* = \min \left\{ \lambda / \frac{\partial E_p(\theta^e + \lambda \mu)}{\partial \lambda} = 0 \right\}, \text{ e}$$

$\frac{\partial E_p(.)}{\partial \lambda}$: derivada direcional da energia potencial definida para a configuração pós-defeito do sistema

Considerando-se todos os raios emanados de θ^e , a Superfície Limite de Energia Potencial SLEP, pode ser caracterizada [16] por:

$$\nabla E_p(\theta) \bullet (\theta^1 - \theta^e) = - \sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta)(\theta^1 - \theta^e) = 0 \quad (2.7)$$

ou na forma vetorial

$$g(\theta) \bullet (\theta^1 - \theta^e) = 0$$

onde: (2.8)

$$g(\theta) = - \frac{\partial E_p}{\partial \theta} = - \nabla E_p$$

O produto escalar (2.8) é negativo na região interna à SLEP, nulo no ponto de cruzamento e positivo após o cruzamento. O vetor ∇E_p é ortogonal às superfícies equipotenciais de E_p e aponta na direção de crescimento dos contornos da E_p .

O método SLEP iterativo utiliza estas propriedades na identificação de trajetórias estáveis e instáveis, dentro de um processo iterativo de cálculo de tempos críticos, descrito sucintamente no próximo item.

2.2.5. Processo iterativo de cálculo da energia crítica e tempo crítico de eliminação do defeito

O algoritmo proposto em [11,16], basicamente consiste em se monitorar a derivada direcional da função energia potencial, definida na equação (2.8), ao longo das trajetórias de estados do sistema sob-defeito e pós-defeito, calculadas utilizando-se expansão em série de Taylor, para detectar a instabilidade do sistema (instante de cruzamento com a SLEP).

O processo iterativo na determinação do tempo crítico, ilustrado na Figura 2.3, pode ser descrito da seguinte forma: calcular a trajetória do sistema sob defeito até o cruzamento com a SLEP (θ^{slep}). A energia potencial obtida neste ponto é usada como primeira estimativa de energia crítica. Em seguida, considerando-se ainda a trajetória do sistema durante o defeito, determina-se o instante de tempo no qual a energia total iguala-se à energia crítica inicialmente estimada. O tempo assim calculado é, também, a primeira estimativa de tempo crítico (t_{cr1}^e).

Posteriormente, é simulada e monitorada a trajetória do sistema pós-defeito a partir de t_{cr1}^e . Se a trajetória pós-defeito não alcançar a SLEP, aumenta-se de um percentual a energia crítica anteriormente estimada e calcula-se um novo tempo crítico estimado (t_{cr2}^e). Caso haja cruzamento atua-se de forma oposta. Assim, são definidas duas estimativas para a energia crítica, uma otimista e outra pessimista.

A partir dessas duas estimativas segue-se um processo do tipo bissecção de cálculo de novas estimativas otimistas e pessimistas para a energia crítica e correspondentes tempos críticos.

Neste processo são calculados $t_{cr1}^e, t_{cr2}^e, \dots, t_{cr7}^e$ até obter-se uma aproximação da trajetória que “tangência” com a SLEP. A convergência é definida em termos de energia, entre duas estimativas no processo iterativo. Na ilustração da Figura 2.3, o tempo crítico corresponde a $t_{cr7}^e = t_{cr}^*$. Maiores detalhes podem ser encontrados em [11,16].

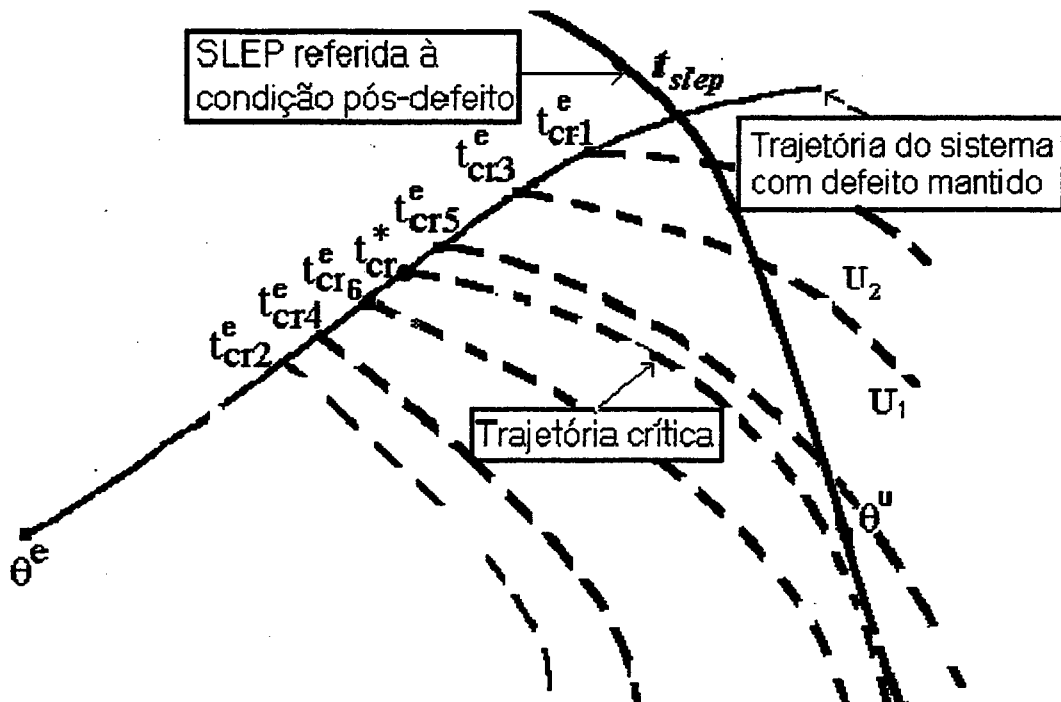


Figura 2.3 Ilustração de como é calculada a energia e o tempo crítico no SLEP iterativo

2.3. O Critério de Áreas Iguais Estendido

O Critério das áreas iguais estendido EEAC (“Extended Equal-Area Criterion”) é uma metodologia de análise da estabilidade transitória de SEP, que tem sido motivo de muitas publicações técnicas nos últimos anos [3-9].

Nesta metodologia a idéia básica é transformar o sistema multimáquina num sistema equivalente com duas máquinas e, posteriormente, a um sistema de uma única máquina equivalente ligada a barra infinita (“One Machine Infinite Bus” - OMIB), para aplicar o clássico critério de áreas iguais. A transformação requer a identificação apropriada do conjunto de máquinas responsáveis pela perda de sincronismo em cada contingência, denominado de conjunto de máquinas críticas ou conjunto crítico.

O método evoluiu de uma formulação inicial denominada EEAC estático (SEEC) [3,5], no qual o OMIB é mantido fixo durante o período transitório, para o EEAC dinâmico (DEEC) [7,8], onde os parâmetros do OMIB são recalculados periodicamente, a partir da simulação da trajetória do sistema usando série de Taylor.

2.3.1. O EEAC estático

A idéia básica do método é transformar um sistema multimáquinas em um sistema equivalente com duas máquinas e, posteriormente, reduzi-lo a um sistema máquina-barra infinita equivalente para poder aplicar o critério de áreas iguais.

A seguir realiza-se uma descrição sucinta deste procedimento.

2.3.1.1. Dinâmica de um sistema de n_g máquinas

O modelo clássico de representação da dinâmica de um sistema de n_g máquinas é descrito pelas seguintes equações [3]:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i \\ M_i \dot{\omega}_i = Pm_i - Pe_i \end{cases} \quad (2.9)$$

onde:

$$Pe_i = E_i^2 Y_{ii} \cos \varphi_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j Y_{ij} \cos (\delta_i - \delta_j - \varphi_{ij}) \quad (2.10)$$

$$i = 1, 2, \dots, n_g$$

sendo que:

- δ_i - ângulo do rotor da i -ésima máquina em relação a uma referência síncrona;
- ω_i - desvio de velocidade do rotor em relação à referência síncrona;
- M_i - momento angular da i -ésima máquina;
- Pm_i - potência mecânica de entrada da i -ésima máquina;
- Pe_i - potência elétrica injetada na i -ésima barra pela i -ésima máquina;
- E_i - tensão atrás da reatância transitória de eixo direto ($X'd_i$);
- Y_{red} - matriz de admitâncias nodal da rede equivalente reduzida às barras internas das máquinas;
- Y_{ij} - módulo do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
- φ_{ij} - ângulo do ij -ésimo elemento da matriz Y_{red} ;
- n_g - número de máquinas síncronas do sistema.

2.3.1.2. Modelo equivalente agregado de duas máquinas

Durante o transitório as n_g máquinas são classificadas em dois grupos ou conjuntos [4], conforme a Figura 2.4,

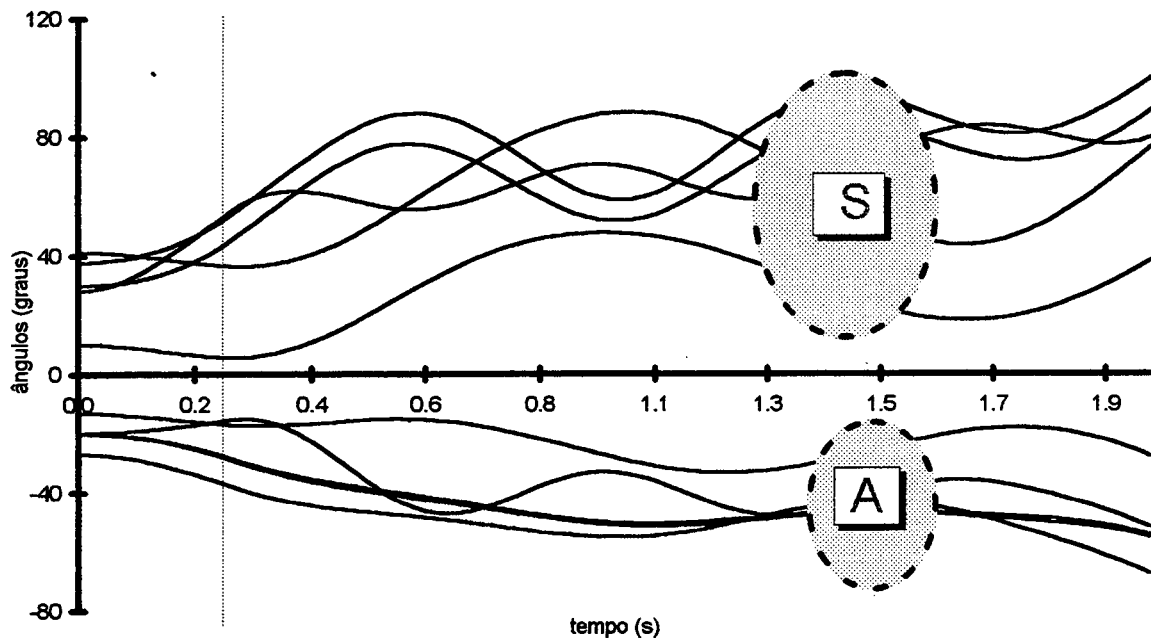


Figura 2.4 Exemplo da variação do ângulo das máquinas para uma determinada contingência

onde:

S - conjunto formado pelas máquinas críticas (“cluster” crítico);

A - conjunto das máquinas restantes.

Cada conjunto é representado por uma máquina equivalente (Figura 2.5) e sua dinâmica é modelada conforme o centro parcial de ângulos de cada conjunto.

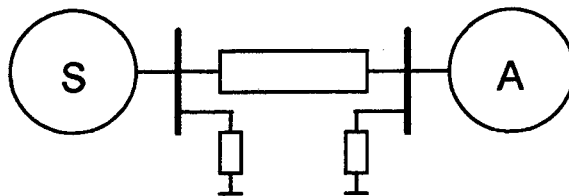


Figura 2.5 Modelo equivalente com duas máquinas

Definindo-se:

s - máquina equivalente do conjunto S ;

a - máquina equivalente do conjunto A .

pode-se escrever:

$$\begin{aligned}
M_s &\triangleq \sum_{i \in S} M_i & ; & \quad \delta_s \triangleq (\sum_{i \in S} M_i \delta_i) / M_s \\
M_a &\triangleq \sum_{j \in A} M_j & ; & \quad \delta_a \triangleq (\sum_{j \in A} M_j \delta_j) / M_a
\end{aligned}
\tag{2.11}$$

onde:

- M_s - momento angular da máquina equivalente do conjunto S ;
- M_a - momento angular da máquina equivalente do conjunto A ;
- δ_s - centro parcial de ângulos do conjunto S ;
- δ_a - centro parcial de ângulos do conjunto A .

Então, as equações que descrevem a dinâmica das duas máquinas equivalentes são:

$$\begin{cases}
\dot{\delta}_s = \omega_s \\
M_s \ddot{\delta}_s = \sum_{i \in S} (Pm_i - Pe_i) \\
\dot{\delta}_a = \omega_a \\
M_a \ddot{\delta}_a = \sum_{j \in A} (Pm_j - Pe_j)
\end{cases}
\tag{2.12}$$

Desprezando as diferenças angulares entre as máquinas de um mesmo conjunto, o que equivale a supor os ângulos das máquinas iguais ao centro parcial de ângulos do respectivo conjunto, têm-se:

$$\begin{cases}
Pe_i = E_i^2 Y_{ii} \cos \varphi_{ii} + E_i \sum_{\substack{k \in S \\ k \neq i}} E_k Y_{ik} \cos \varphi_{ik} + E_i \sum_{j \in A} E_j Y_{ij} \cos (\delta_s - \delta_a - \varphi_{ij}) & , \forall i \in S \\
Pe_j = E_j^2 Y_{jj} \cos \varphi_{jj} + E_j \sum_{\substack{k \in A \\ k \neq j}} E_k Y_{jk} \cos \varphi_{jk} + E_j \sum_{i \in S} E_i Y_{ji} \cos (\delta_s - \delta_a - \varphi_{ij}) & , \forall j \in A
\end{cases}
\tag{2.13}$$

onde:

$$\begin{aligned}
\delta_i &= \delta_s, & \forall i \in S \\
\delta_j &= \delta_a, & \forall j \in A
\end{aligned}$$

Agora podemos transformar o sistema em um sistema de uma única máquina ligada a barra infinita para, posteriormente, aplicar o critério de áreas iguais.

2.3.1.3. Modelo equivalente com uma máquina ligada a barra infinita

O sistema de uma máquina equivalente ligada a barra infinita ou OMIB equivalente, representado pela Figura 2.6,

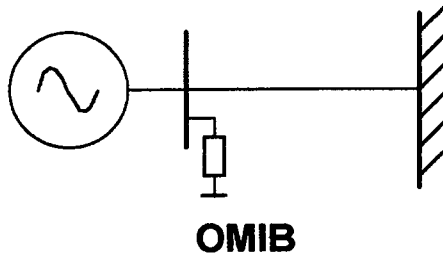


Figura 2.6 Modelo equivalente máquina barra infinita

é obtido definindo-se:

$$\delta \triangleq \delta_s - \delta_a ,$$

e, conseqüentemente:

$$\ddot{\delta} = \ddot{\delta}_s - \ddot{\delta}_a .$$

Então, das equações (2.12), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} \ddot{\delta} &= \frac{1}{M_s} \sum_{i \in S} (Pm_i - Pe_i) - \frac{1}{M_a} \sum_{j \in A} (Pm_j - Pe_j) \\ &= \frac{1}{M_s M_a} \left[M_a \sum_{i \in S} (Pm_i - Pe_i) - M_s \sum_{j \in A} (Pm_j - Pe_j) \right] \end{aligned} \quad (2.14)$$

Multiplicando-se ambos os membros de (2.14) por $1/(M_s + M_a)$ e definindo-se:

$$M_T \triangleq M_s + M_a \equiv \sum_{i=1}^{n_g} M_i \quad : \text{Momento angular total do sistema}$$

$$M_{eq} \triangleq \frac{M_s M_a}{M_T} \quad : \text{Momento angular do sistema equivalente}$$

$$Pm_s \triangleq \sum_{i \in S} Pm_i$$

$$Pe_s \triangleq \sum_{i \in S} Pe_i$$

$$Pm_a \triangleq \sum_{j \in A} Pm_j$$

$$Pe_a \triangleq \sum_{j \in A} Pe_j$$

é obtida a equação que descreve a dinâmica do sistema equivalente:

$$M_{eq} \ddot{\delta} = Pm_{eq} - Pe_{eq} \quad (2.15)$$

onde:

$$Pm_{eq} \triangleq \frac{1}{M_T} (M_a Pm_s - M_s Pm_a) \quad : \text{Potência mecânica equivalente.}$$

$$Pe_{eq} \triangleq \frac{1}{M_T} (M_a Pe_s - M_s Pe_a) \quad : \text{Potência elétrica equivalente.}$$

Utilizando-se a equação (2.13), e fazendo-se as transformações apropriadas, a potência elétrica do sistema equivalente pode ser escrita na seguinte forma padrão:

$$Pe_{eq} = Pc + Pmax \cdot \text{sen}(\delta - \nu) \quad (2.16)$$

onde:

$$Pc \triangleq \frac{1}{M_T} \left[M_a \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} E_i E_k G_{ik} - M_s \sum_{j \in A} \sum_{k \in A} E_j E_k G_{jk} \right] \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} Pmax \triangleq (C^2 + D^2)^{1/2} \\ \nu \triangleq -\tan^{-1}(C/D) \\ C \triangleq (M_a - M_s) M_T^{-1} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} E_i E_j G_{ij} \\ D \triangleq \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} E_i E_j B_{ij} \\ G_{ij} = Y_{ij} \cdot \cos \varphi_{ij} \quad , \quad B_{ij} = Y_{ij} \cdot \text{sen} \varphi_{ij} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n_g) \end{cases} \quad (2.18)$$

2.3.1.4. Aplicação do critério de áreas iguais

A aplicação do critério de áreas iguais é feita utilizando-se as expressões de potência elétrica, equação (2.16), associadas ao OMIB equivalente de cada configuração do sistema durante a perturbação, conforme é ilustrado na Figura 2.7,

O critério de áreas iguais estabelece que, o sistema é estável se a área acelerante A_{ace} , adquirida durante o defeito, é menor ou igual a área desacelerante máxima possível A_{des} , durante a configuração pós-defeito. Define-se a margem de estabilidade ou de segurança η [4], como:

$$\eta = A_{des} - A_{ace} = f(\delta_t) \quad (2.19)$$

Então, se $\eta \geq 0$ o sistema é estável e, se $\eta < 0$ o sistema é instável. Fazendo $\eta=0$ na equação (2.19), pode ser obtido o ângulo limite para manter a estabilidade do sistema, chamado de ângulo crítico (δ_c), e com isso calcular o tempo crítico de eliminação do defeito.

2.3.1.5. Cálculo do tempo crítico

Uma vez calculado o ângulo crítico, a expansão em série de Taylor da evolução no tempo do ângulo do OMIB equivalente, pode ser utilizada para calcular o tempo crítico:

$$\delta_{t_n} = \delta_{t_{n-1}} + \dot{\delta}_{t_{n-1}} \Delta t + \frac{1}{2} \ddot{\delta}_{t_{n-1}} \Delta t^2 + \frac{1}{6} \dddot{\delta}_{t_{n-1}} \Delta t^3 + \frac{1}{24} \delta_{t_{n-1}}^{(4)} \Delta t^4 + \dots \quad (2.20)$$

onde

$$\begin{aligned} \delta_{t_n} & \quad - \quad \text{ângulo do OMIB equivalente no instante } t_n \\ t_{n-1} & \quad = \quad t_n - \Delta t \\ \Delta t & \quad - \quad \text{passo de integração} \\ \dot{\delta}_{t_{n-1}}, \ddot{\delta}_{t_{n-1}}, \dots & \quad - \quad d\delta/dt, d^2\delta/dt^2, \dots \text{ no instante } t_{n-1} \end{aligned}$$

Duas estratégias poderiam ser empregadas para resolver a equação (2.20) e assim determinar o tempo crítico, apresentadas a seguir:

Estratégia 1 :

Em [3-6] é proposto um cálculo direto, utilizando as derivadas do ângulo em $t=0^+$ e compensando o erro com o fator α . Assim:

$$\delta_c = \delta_o + \frac{1}{2\alpha} \gamma t_c^2 + \frac{\alpha_1}{24\alpha^2} \bar{\gamma} t_c^4 \quad (2.21)$$

onde:

$$\gamma = \ddot{\delta}_{t_o^+}; \quad \bar{\gamma} = \delta_{t_o^+}^{(4)}; \quad \alpha = \alpha_1 \alpha_2$$

Então, o tempo crítico seria calculado resolvendo a equação quadrática (2.21). Os parâmetros α , α_1 e α_2 não são únicos, e deve ser estabelecida uma heurística para se determinar os valores apropriados, que dependem da localização da falta e do sistema analisado [4].

Estratégia 2 :

Utiliza-se integração numérica por passos, com renovação dos coeficientes da série em cada intervalo. Neste caso, se parte da equação de oscilação do OMIB equivalente, utilizando a forma padrão para a potência elétrica, apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} M_{eq} \ddot{\delta} &= Pm_{eq} - Pc - Pmax \cdot \text{sen}(\delta - \nu) \\ \delta &= \omega \end{aligned} \quad (2.22)$$

Expandindo em séries de Taylor em torno ao ponto $(t_n, \omega_n, \delta_n)$ e até $(t_n + \Delta t, \omega_{n+1}, \delta_{n+1})$, e desprezando os termos acima da quarta ordem, resulta:

$$\begin{bmatrix} \omega_{n+1} \\ \delta_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_n \\ \delta_n \end{bmatrix} + \Delta t \begin{bmatrix} \dot{\omega} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} + \frac{\Delta t^2}{2!} \begin{bmatrix} \ddot{\omega} \\ \ddot{\delta} \end{bmatrix} + \frac{\Delta t^3}{3!} \begin{bmatrix} \dddot{\omega} \\ \dddot{\delta} \end{bmatrix} + \frac{\Delta t^4}{4!} \begin{bmatrix} \ddddot{\omega} \\ \ddddot{\delta} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Aproveitando a relação existente entre ω e δ , as suas derivadas de primeira até quarta ordem são:

$$\begin{aligned} \delta &= \omega \\ \ddot{\delta} &= \ddot{\omega} = \frac{1}{M_{eq}} [Pm_{eq} - Pc - Pmax \cdot \text{sen}(\delta - \nu)] \\ \ddot{\delta} &= \ddot{\omega} = -\frac{Pmax}{M_{eq}} \cos(\delta - \nu) \cdot \omega \\ \dddot{\delta} &= \dddot{\omega} = -\frac{Pmax}{M_{eq}} [\cos(\delta - \nu) \cdot \dot{\omega} - \text{sen}(\delta - \nu) \cdot \omega^2] \\ \ddddot{\delta} &= \ddddot{\omega} = -\frac{Pmax}{M_{eq}} [\cos(\delta - \nu) \cdot \ddot{\omega} - 3 \text{sen}(\delta - \nu) \dot{\omega} \cdot \omega - \cos(\delta - \nu) \delta \cdot \omega^2] \end{aligned} \quad (2.24)$$

Em testes realizados [1] para o cálculo do tempo crítico, com as duas estratégias descritas, a integração numérica por passos mostrou os melhores resultados, pois ela fornece maior precisão e não implica em esforço computacional adicional.

Para calcular o tempo crítico de uma contingência então, utilizando o critério de áreas iguais estendido estático é feito o seguinte procedimento [3,4]:

- i. construir uma lista de conjuntos candidatos à conjunto crítico (“cluster” crítico), composto cada um deles, por uma ou várias máquinas;*
- ii. calcular o ângulo crítico do OMIB equivalente e seu respectivo tempo crítico, para cada conjunto candidato da lista;*
- iii. escolher como conjunto crítico para a contingência sob análise, o conjunto que forneça o menor tempo crítico.*

A escolha correta dos conjuntos críticos candidatos é uma questão fundamental para uma correta utilização do EEAC. No próximo item apresentam-se diferentes estratégias para esta escolha.

2.3.1.6. Estratégias para escolha dos conjuntos críticos candidatos

Uma das estratégias que tem sido propostas na literatura supõe que as máquinas candidatas a perder o sincronismo são aquelas que têm maior aceleração no início do período transitório. O procedimento correto seria calcular a aceleração inicial absoluta de todas as máquinas e escolher aquelas com aceleração maior que um determinado percentual da máxima, fazendo com estas máquinas todas as combinações possíveis. Esta estratégia é chamada de critério da aceleração inicial [4].

Outra estratégia é o critério composto: aceleração inicial e distância elétrica [6]. Esta estratégia considera que, além da aceleração inicial, as máquinas com maior probabilidade de perder o sincronismo são as máquinas que estão eletricamente mais próximas da barra em curto-circuito. O procedimento é o mesmo da estratégia anterior, só que as máquinas são escolhidas pelo produto da aceleração inicial absoluta pela distância elétrica pré-falta.

Para o EEAC dinâmico, apresentado no próximo item, foi proposto um procedimento que também poderia ser empregado no EEAC estático. Este procedimento consiste em fazer uma classificação (“ranking”) das máquinas mais avançadas no instante

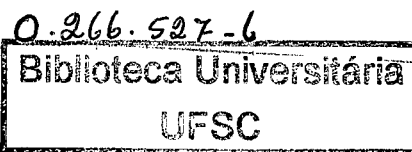
de tempo associado ao ângulo de equilíbrio instável δ_u^e [8]. A conjectura utilizada nesta estratégia considera que as máquinas críticas podem ser identificadas segundo o grau relativo de afastamento de cada máquina, obtido na trajetória próxima da crítica (defeito mantido por um tempo superior ao tempo crítico) e observado no ponto de equilíbrio instável do OMIB equivalente, δ_u .

A estratégia consiste em:

- i. *utilizar o critério composto para achar, utilizando o EEAC estático, o primeiro conjunto para o qual seja possível calcular um tempo crítico, t_{cr}^e ;*
- ii. *calcular o ângulo de equilíbrio instável pós-defeito δ_u^e e seu correspondente tempo $t_{cr}^e + t_u^e$ (ver Figura 2.7), para o OMIB encontrado em i;*
- iii. *dividir os intervalos de tempo $[0; t_{cr}^e]$ e $[t_{cr}^e; t_{cr}^e + t_u^e]$ em subintervalos, segundo a precisão requerida. Então, utilizando a expansão em série de Taylor, resolver o sistema de equações (2.9) para se obter os δ_i e suas derivadas ω_i ($\forall i=1,2,\dots,n_g$);*
- iv. *classificar em ordem decrescente as máquinas mais distantes (avançadas ou atrasadas em $t = t_{cr}^e + t_u^e$) em relação ao centro de ângulos;*
- v. *o primeiro conjunto crítico candidato está formado pela máquina mais distante. O segundo pelas duas primeiras, e assim por diante. O máximo número de conjuntos candidatos será de n_g .*

O algoritmo assim proposto, supõe que a primeira estimativa de tempo crítico, t_{cr}^e , achado no passo i é otimista (ou seja maior que o tempo crítico real). Por causa disso, sempre se terá perda de sincronismo do sistema na simulação passo a passo feita no passo *iii*, e as máquinas mais distantes podem ser identificadas sem ambigüidades [7,8].

2.3.2. O EEAC dinâmico



No sentido de melhorar a precisão do EEAC, foi proposto em [7,8] o “Dynamic Extended Equal Area Criterion” (DEEAC). As principais mudanças feitas em relação ao EEAC estático, são:

- as diferenças angulares entre as máquinas de cada “cluster” crítico desprezadas no EEAC, são consideradas;
- os parâmetros do equivalente máquina ligada a barra infinita (OMIB), são recalculados durante o transitório;
- o cluster de máquinas críticas é determinado a partir de um “ranking”, como foi apresentado no item anterior.

A metodologia para se aplicar o critério de áreas iguais estendido dinâmico, constitui-se de duas partes principais, descritas a seguir:

- obter um “ranking” de máquinas críticas (“Critical Machines Ranking”), como foi apresentado no item 2.3.1.6;
- simular a trajetória do sistema para um tempo crítico estimado, t_{cr}^e , e atualizar os parâmetros do OMIB, o que será apresentado no item 2.3.2.2.

2.3.2.1. Modelo equivalente do DEEAC

Partindo das mesmas definições estabelecidas no item 2.3.1.2 e da equação (2.11), tem-se:

$$\begin{aligned}\delta_k &= \delta_s + \xi_k, k \in S \\ \delta_j &= \delta_a + \xi_j, j \in A\end{aligned}\tag{2.25}$$

onde:

- ξ_k - diferença angular da k -ésima máquina ($k \in S$), em relação ao centro parcial de ângulos do conjunto S ; e
- ξ_j - diferença angular da j -ésima máquina ($j \in A$), em relação ao centro parcial de ângulos do conjunto A .

Assim, o OMIB dinâmico equivalente é descrito pela seguinte equação [7]:

$$M\ddot{\delta} = Pm_{eq} - Pe_{eq} \quad (2.26)$$

onde:

$$Pe_{eq} = Pc + Pmax \sin(\delta - \nu)$$

$$Pc \triangleq \frac{1}{M_T} \left[M_a \sum_{i \in S} \sum_{k \in S} G_{ik} \cos(\xi_i - \xi_k) - M_s \sum_{j \in A} \sum_{k \in A} G_{jk} \cos(\xi_j - \xi_k) \right]$$

$$Pmax \triangleq (C^2 + D^2)^{1/2}$$

$$\nu \triangleq -\tan^{-1}(C/D)$$

$$C \triangleq \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} B_{ij} \sin(\xi_i - \xi_j) + (M_a - M_s) M_T^{-1} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} G_{ij} \cos(\xi_i - \xi_j)$$

$$D \triangleq \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} B_{ij} \cos(\xi_i - \xi_j) - (M_a - M_s) M_T^{-1} \sum_{i \in S} \sum_{j \in A} G_{ij} \sin(\xi_i - \xi_j)$$

$$G_{ij} \triangleq E_i E_j Y_{ij} \cos \varphi_{ij} \quad ; \quad B_{ij} \triangleq E_i E_j Y_{ij} \sin \varphi_{ij} \quad (2.27)$$

Em relação a estas equações, as diferenças entre o OMIB estático e o dinâmico estão nos parâmetros Pc , $Pmax$ e ν , os quais variam com ξ_i e ξ_j que, por sua vez, variam no tempo.

2.3.2.2. Simulação da trajetória e OMIB equivalente

Para se considerar a variação dos parâmetros do OMIB dinâmico, foi proposto em [7,8] o procedimento apresentado a seguir :

- i. utilizar o EEAC estático para calcular um conjunto crítico inicial e seus correspondentes δ_c^e , δ_u^e , t_{cr}^e e t_u^e . O t_{cr}^e assim estimado é chamado de tempo crítico estático;
- ii. dividir os períodos sob defeito $[0 ; t_{cr}^e]$ e pós-defeito $[t_{cr}^e ; t_{cr}^e + t_u^e]$ em subintervalos, segundo a precisão requerida. Utilizando a Figura 2.8 para se ilustrar o procedimento, seriam 3 e 4 intervalos respectivamente: 0 , $t_{cr}^e/3$, $2t_{cr}^e/3$, t_{cr}^e , $(t_{cr}^e + t_u^e)/4$, $(t_{cr}^e + t_u^e)/2$, $3(t_{cr}^e + t_u^e)/4$ e $(t_{cr}^e + t_u^e)$;

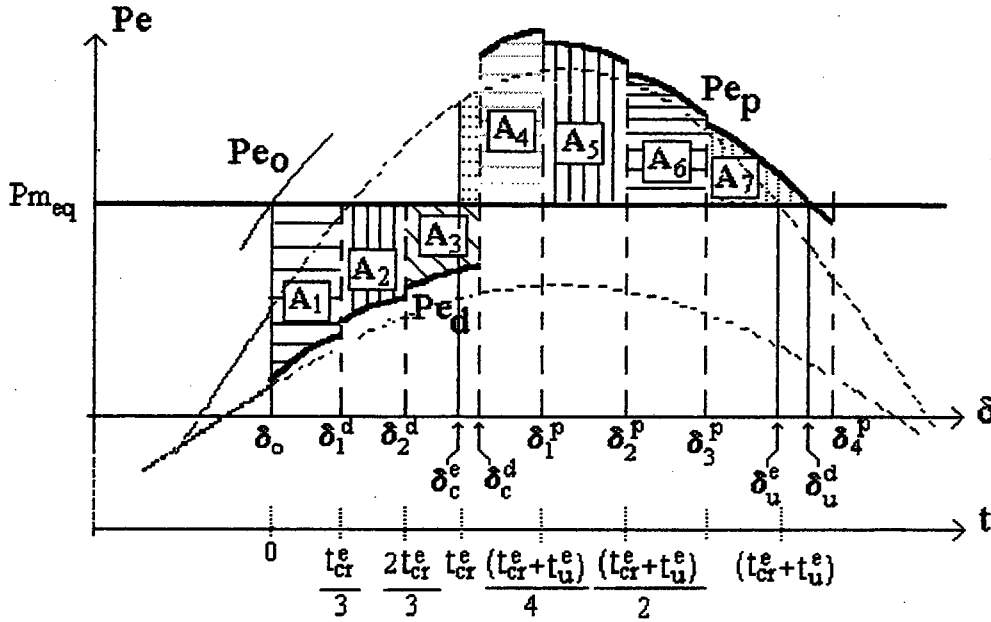


Figura 2.8 Representação do procedimento que utiliza o OMIB dinâmico

- iii. calcular em cada subintervalo os ângulos individuais δ_i ($\forall i=1,2,\dots,n_p$) de cada máquina, utilizando série de Taylor para o sistema multimáquina, equação (2.10), e renovar os parâmetros do OMIB dinâmico equivalente, segundo as equações (2.26) e (2.27);
- iv. substituir o sistema multimáquina com o OMIB equivalente em cada subintervalo, e calcular as novas áreas correspondentes ao subintervalo de tempo simulado: $A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, A_6$ e A_7 ;
- v. somar em forma algébrica as áreas da “margem dinâmica” obtidas em cada intervalo de tempo: $\eta = (A_4 + A_5 + A_6 + A_7) - (A_1 + A_2 + A_3)$
- vi. como a margem assim obtida, em geral não vai ser zero, deve-se calcular a correção do tempo crítico, Δt_{cr} , que torna zero a “margem dinâmica”, para assim obter o tempo crítico dinâmico: $t_{cr} = t_{cr}^e + \Delta t_{cr}$

Foi visto em [1] que, na maioria dos casos, o DEEAC apresenta um desempenho aceitável, com erro inferior a 15%. Para tempos críticos maiores, persistem situações nas quais não consegue “melhorar” o tempo crítico calculado pelo estático e até faz estimativas “piores”. Estas situações correspondem a contingências com tempos críticos maiores que 0,35 segundos, onde a perda de sincronismo acontece na segunda ou terceira oscilação do sistema.

O EEAC, então, foi utilizado obter o OMIB equivalente do sistema para cada contingência analisada. Para este OMIB são calculadas as margens de segurança e os coeficientes de sensibilidade. Se a contingência é considerada crítica, o DEEAC é empregado para melhorar a precisão do OMIB, e por conseguinte, a precisão das margens e dos coeficientes de sensibilidade.

2.4. Margens de segurança do SLEP iterativo e do EEAC

A margem de segurança, associada a uma contingência, pode ser interpretada como uma medida de distância em relação à condição limite de estabilidade do sistema. Considerando um conjunto de contingências analisadas para tempos determinados de permanência da falta (por exemplo o tempo de atuação da proteção principal), a margem de segurança permite identificar as contingências mais severas. A margem de segurança é, então, um índice de desempenho de um sistema, relativo aos transitórios eletromecânicos.

Em termos de energia, a expressão da margem de segurança para uma contingência é definida em [11] como:

$$\eta_e = \frac{E_{crit} - E_e}{E_{crit}} \quad (2.28)$$

onde:

E_{crit} - energia potencial crítica total do sistema;

E_e - energia total do sistema no instante de eliminação do defeito.

Para o critério de áreas iguais estendido, em [4,5], é definida uma margem absoluta de estabilidade do sistema, η_1 , como sendo a diferença entre a área desacelerante e a área acelerante dos gráficos potência-ângulo associados, ou seja:

$$\eta_1 = A_{des} - A_{ace} \quad (2.29)$$

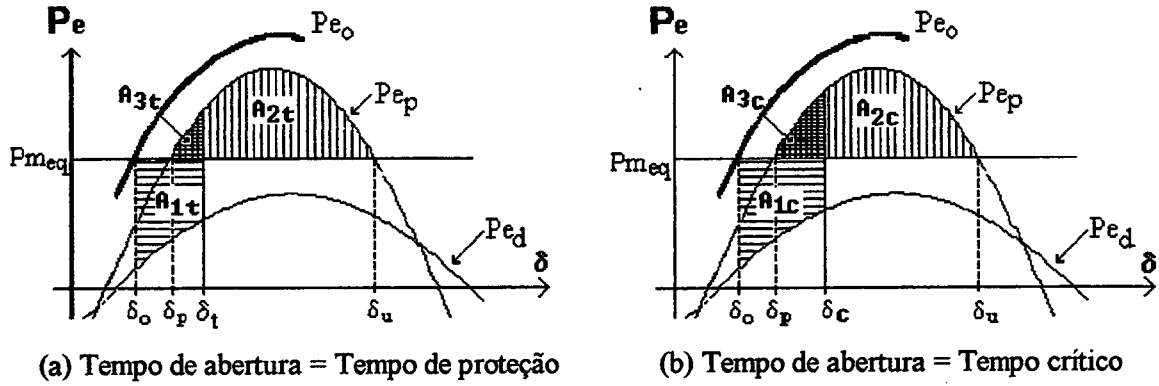


Figura 2.9 Áreas acelerante e desacelerante do EEAC, para permanência da falta igual ao tempo da proteção e ao tempo crítico

Na Figura 2.9 são ilustradas as áreas acelerante e desacelerante do OMIB, para permanência da falta igual ao tempo da proteção (a) e ao tempo crítico (b). Da Figura 2.9.a pode-se escrever:

$$\eta_1 = A_{2t} - A_{1t} \quad (2.30)$$

A área acelerante crítica no OMIB é definida como a área entre as curvas de potência mecânica e potência elétrica da configuração sob-defeito, calculada entre o ângulo inicial δ_o e o ângulo crítico da contingência δ_c , apresentados na Figura 2.9.b. Dado que η_1 é uma medida absoluta e não leva em conta o afastamento relativo à condição limite de estabilidade, foi proposta uma segunda margem η_2 , que pondera a margem η_1 em relação à área acelerante crítica, A_{1c} na Figura 2.8.b:

$$\eta_2 = \frac{A_{2t} - A_{1t}}{A_{1c}} = \frac{\eta_1}{A_{1c}} \quad (2.31)$$

O critério de áreas iguais também pode ser expresso como [1]:

$$A_{1t} + A_{3t} \leq A_{2t} + A_{3t} \quad (2.32)$$

onde:

- A_{1t} - energia cinética do sistema no instante de abertura da falta (energia adquirida pelo sistema durante a falta);
- A_{3t} - energia potencial no ponto de abertura do defeito;
- $A_{2t} + A_{3t}$ - energia potencial no ponto de equilíbrio instável δ_u (área entre as curvas de potência mecânica e potência elétrica na configuração pós-defeito).

ou simbolicamente como:

$$V_T(\delta_c, \omega_c) \leq E_P(\delta_u, 0) \quad (2.33)$$

onde V_T é a energia total e E_P a energia potencial.

Da equação (2.33) conclui-se que para haver estabilidade, a energia total adquirida pelo sistema durante o defeito deve ser menor ou igual à energia potencial no ponto de equilíbrio instável para a configuração pós-defeito.

Utilizando a expressão da margem de segurança em termos de energia, equação (2.28), e baseado nas conclusões acima, foi mostrado em [1] que a margem η_e pode ser escrita em termos de áreas das curvas potência-ângulo, como segue:

$$\eta_e = \frac{A_{2c} + A_{3c} - A_{1t} - A_{3t}}{A_{2c} + A_{3c}}$$

Considerando-se que $A_{2c} + A_{3c}$ é igual a $A_{2t} + A_{3t}$, e A_{1c} é igual a A_{2c} , conforme se observa na Figura 2.9, pode-se escrever η_e , da seguinte forma:

$$\eta_e = \frac{\eta_1}{A_{1c} + A_{3c}} \quad (2.34)$$

Com a margem de segurança η_e , definida pela equação (2.34), é possível fazer um acoplamento entre as metodologias SLEP iterativo e EEAC, no processo de análise e correção da segurança dinâmica dos SEP.

Embora seja compatível a quantificação da margem de segurança das duas metodologias, podem existir diferenças nos valores calculados. Devido às imprecisões próprias do EEAC, a margem de segurança fornecida pelo SLEP iterativo será utilizada para avaliar o nível de segurança de cada contingência, e como critério de parada do processo iterativo. Contudo, são os coeficientes de sensibilidade da margem η_e , obtidos do OMIB equivalente, os utilizados na equação de restrição de estabilidade transitória do problema de otimização, formulado para identificar e quantificar as ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica do sistema.

2.5. Coeficientes de sensibilidade da margem de segurança usando o OMIB equivalente

Na obtenção do OMIB equivalente para cada contingência, o sistema multimáquina é transformado para duas máquinas equivalentes, S e A . O conjunto S (“cluster” crítico) é composto pelas máquinas responsáveis pela perda de sincronismo do sistema, e o conjunto A é formado pelas máquinas restantes.

Fazendo uma redistribuição (realocação) apropriada da geração de potência ativa entre estes dois conjuntos, é possível alterar convenientemente a resposta transitória do sistema. Deve ser observado que as variações de potência ativa em um conjunto, por exemplo o conjunto S , são compensadas totalmente pelo outro, o conjunto A .

Calculando os coeficientes de sensibilidade da margem, em relação à potência ativa de um conjunto (por exemplo o S), pode-se quantificar uma ação de controle do tipo redespacho para melhorar a segurança dinâmica quando for necessário.

Os coeficientes de sensibilidade de primeira e segunda ordem, da margem η_e , são definidos como:

$$\begin{aligned} S_{P_{ms}} &\triangleq \frac{d\eta_e}{dP_{m_s}} \\ S'_{P_{ms}} &\triangleq \frac{d^2\eta_e}{dP_{m_s}^2} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Em [1] é apresentada a dedução detalhada das expressões analíticas destes índices. Utilizando a expansão em série de Taylor até a segunda ordem, em torno do valor atual de η_e , tem-se:

$$\eta'_e = \eta_e^o + \Delta\eta_e = \eta_e^o + S_{P_{ms}} \Big|_{P_{ms}^o} \Delta P_{m_s} + \frac{1}{2} S'_{P_{ms}} \Big|_{P_{ms}^o} \Delta P_{m_s}^2 \quad (2.36)$$

onde:

- η'_e - margem de segurança obtida depois do redespacho;
- η_e^o - margem de segurança inicial;

- $\Delta\eta_e$ - variação na margem de segurança;
- ΔPm_s - variação de potência ativa no conjunto crítico;
- S_{Pms} - coeficiente de sensibilidade de primeira ordem, da margem de segurança em relação à potência ativa gerada no conjunto crítico;
- S'_{Pms} - coeficiente de sensibilidade de segunda ordem, da margem de segurança em relação à potência ativa gerada no conjunto crítico;
- Pm_s^o - potência ativa atual no conjunto crítico.

Resolvendo a equação (2.36) para ΔPm_s , tem-se:

$$\Delta Pm_s = \frac{-S_{Pms}^o \pm \sqrt{S_{Pms}^o{}^2 + 2S'_{Pms}^o \Delta\eta_e}}{S'_{Pms}^o} \quad (2.37)$$

A equação (2.36) foi utilizada em [1] para estimar a nova margem de segurança de cada contingência, obtida logo após um redespacho de geração ativa, no ACUCSO simultâneo. Já a equação (2.37) foi utilizada em [1] para quantificar a ação de controle, do tipo redespacho de geração ativa, requerida no conjunto de máquinas críticas de uma contingência, para se obter um nível de segurança pré-determinado (a margem mínima), no ACUCSO para a pior contingência e no simultâneo. Maiores detalhes serão vistos no próximo capítulo.

2.6. Comentários

Neste capítulo foi apresentado um resumo das metodologias SLEP iterativo e critério de áreas iguais estendido estático e dinâmico; abordando a fundamentação teórica e a formulação matemática envolvida.

Foi apresentado também a formulação da margem de segurança e coeficientes de sensibilidade, obtidos do OMIB equivalente. Estes serão utilizados para determinar ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica, que será analisada no próximo capítulo.

Deve ser destacado que a correta escolha do conjunto de máquinas críticas, ou seja, as máquinas responsáveis pela perda de sincronismo na ocorrência de uma contingência, é essencial para aplicação do critério de áreas iguais estendido e utilização apropriada dos coeficientes de sensibilidade da margem de segurança, obtidos do OMIB equivalente.

As dificuldades existentes na determinação dos conjuntos críticos candidatos foram discutidas em [1], onde foi mostrado também que nenhuma das estratégias é totalmente confiável. Mesmo assim, a estratégia da classificação das máquinas mais afastadas do centro de ângulo, mostra-se como a mais apropriada na identificação das máquinas críticas. Neste trabalho, assim como em [1], este problema foi contornado utilizando as trajetórias críticas obtidas diretamente do SLEP.

O DEEAC será utilizado em contingências que possuam tempos críticos menores que 0,35 segundos, pois melhora apreciavelmente o desempenho do EEAC, conforme foi avaliado em [1]. Isto implicará em melhora da precisão do OMIB e, por conseguinte, a precisão das margens e dos coeficientes de sensibilidade.

CAPÍTULO 3

Melhoria da Segurança Dinâmica de SEP

3.1. Introdução

O valor da potência ativa a ser gerada nas máquinas síncronas dos modernos SEP é obtido, em geral, através de um despacho econômico de geração que procura otimizar os recursos energéticos disponíveis no sistema. O perfil de geração assim obtido, deve ser preservado, a menos que o nível de segurança do sistema esteja comprometido.

Considerando este aspecto, as ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica do tipo redespacho de geração de potência ativa, devem provocar o menor desvio possível em relação ao ponto de operação inicial.

Sendo assim, foi formulado em [1] um problema de otimização que, minimizando o desvio do ponto de operação, leva o sistema para uma nova condição que satisfaça as restrições de estabilidade transitória e as limitações físicas dos equipamentos. Nos próximos itens este assunto é abordado em detalhes. São apresentados também as soluções já desenvolvidas anteriormente para resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado como um problema de otimização.

3.2. Metodologia Geral para a Melhoria da Segurança Dinâmica.

Um procedimento geral para a correção da segurança dinâmica, deve contemplar basicamente os seguintes passos:

- estabelecer um valor mínimo para a margem de segurança (η_{min});
- avaliar a segurança do sistema, ou seja, para uma lista de n contingências, encontrar o conjunto que não satisfaz o nível de segurança requerido ($\eta_k < \eta_{min}$);
- identificar e quantificar ações de controle para obter uma condição segura;
- encontrar e avaliar a nova condição de regime permanente do sistema.

No procedimento conceitual descrito, para se levar em conta as interações entre as contingências e os redespachos e calcular as melhores ações de controle, deve-se dispor de um módulo de otimização. É estabelecido então um processo iterativo, ilustrado na Figura 3.1.

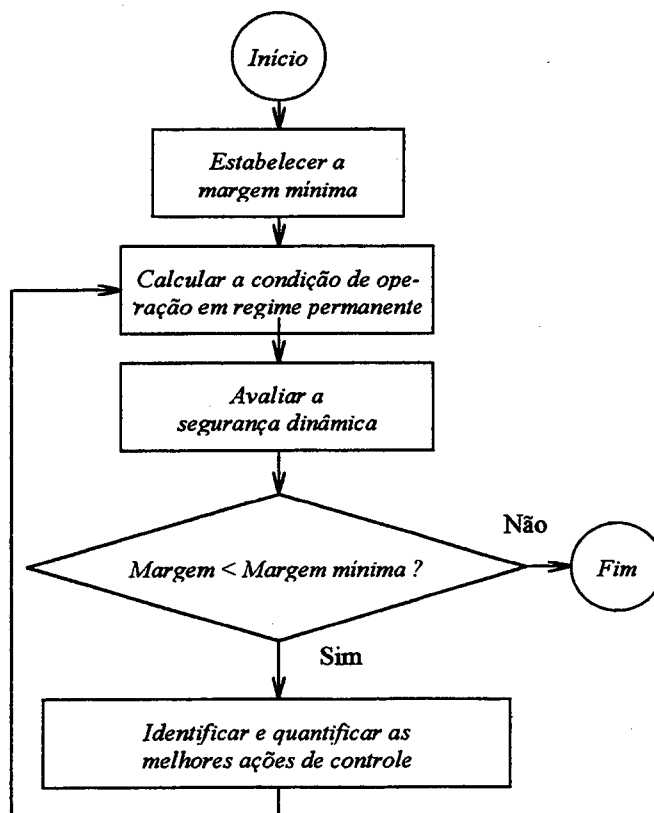


Figura 3.1 Algoritmo geral conceitual de melhoria da segurança dinâmica dos SEP.

Não existe uma forma única de encarar o problema da melhoria da segurança, e diferentes critérios e estratégias podem ser estabelecidos para identificar e quantificar as ações de controle. Com este objetivo, foi formulado em [1] um problema de otimização com o objetivo de encontrar as melhores ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica. Nos próximos itens abordaremos este assunto.

3.3. Problemas de Otimização

Um problema de otimização é em geral constituído de três elementos básicos:

1. um conjunto de variáveis independentes, sobre as quais a otimização é executada;
2. um conjunto de condições, chamadas restrições, que definem valores aceitáveis das variáveis;
3. um índice a ser otimizado, o qual representa uma medida de desempenho e é chamado convencionalmente de função objetivo.

A solução de um problema desse tipo é um conjunto de valores possíveis das variáveis, para os quais a função objetivo assume valor “ótimo”. Em termos matemáticos, a otimização em geral envolve a maximização ou minimização do índice de desempenho, sujeito a um conjunto de restrições. O problema é analiticamente expresso como:

$$\begin{array}{ll}
 \text{Maximizar } f(x) & \text{Minimizar } f(x) \\
 \text{sujeito a} & \text{sujeito a} \\
 C_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, m & \text{ou} \quad C_i(x) \geq 0 \quad i = 1, \dots, m \\
 C_i(x) = 0 \quad i = (m+1), \dots, l & C_i(x) = 0 \quad i = (m+1), \dots, l
 \end{array}$$

onde x é o conjunto de variáveis sobre as quais a otimização é efetuada, $f(.)$ é a função objetivo e $C(.)$ é o conjunto de restrições a serem satisfeitas.

3.4. Melhoria da Segurança Dinâmica como um Problema de Otimização

O problema de otimização, formulado em [1], baseia-se na minimização do desvio em relação a um ponto de operação ótimo, definido segundo critérios da operação em regime permanente. A função objetivo deve ser penalizada em função das variações de grande magnitude a partir da solução inicial, possuindo fatores de ponderação que levam em consideração os custos incrementais e a sensibilidade na segurança. O conjunto de restrições é composto pelas restrições de estabilidade transitória, restrições dos componentes do sistema e pela equação de balanço de potência. Nos próximos sub-itens serão apresentados a formulação matemática desenvolvida para as equações de restrições e para a função objetivo.

3.4.1. Restrições de estabilidade transitória

Do conjunto de n contingências analisadas $\{N\}$, é obtido igual número de restrições de desigualdade a serem satisfeitas, expressas como:

$$\eta_k^r \geq \eta_{min} \quad (k=1,2,\dots,n) \quad (3.1)$$

onde:

$$\eta_k^r = \eta_k^o + S_{k,P_{m,k}} \Big|_{P_{m,k}^0} \Delta P_{m,s,k} + \frac{1}{2} S_{k,P_{m,k}}' \Big|_{P_{m,k}^0} \Delta P_{m,s,k}^2 \quad (3.2)$$

$$\Delta P_{m,s,k} = \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P_{g_i} \quad (3.3)$$

sendo:

η_k^r - margem de segurança da k -ésima contingência, obtida depois do redespacho;

η_{min} - margem mínima requisitada;

η_k^o - margem de segurança atual da k -ésima contingência;

$S_{k,Pmsk}$ - coeficiente de sensibilidade de primeira ordem da margem de segurança da k -ésima contingência em relação à potência gerada no seu conjunto crítico;

$S'_{k,Pms,k}$ - coeficiente de sensibilidade de segunda ordem da margem de segurança da k -ésima contingência em relação à potência gerada no seu conjunto crítico;

$\Delta P_{ms,k}$ - variação de geração ativa no conjunto crítico da k -ésima contingência;

n_g - número de geradores do sistema;

$\Gamma_{k,i} = \begin{cases} -1 & \text{se a máquina } i \text{ pertence ao conjunto crítico da } k\text{-ésima} \\ & \text{contingência;} \end{cases}$

0 : se a máquina i não pertence ao conjunto crítico;

ΔP_{g_i} - redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina.

3.4.2. Restrições das limitações físicas das máquinas

Em um fluxo de potência ótimo, devem ser satisfeitas todas as restrições operacionais, como limites de tensão nas barras, fluxos de potência nos circuitos, limites de potência nas máquinas síncronas etc, aumentando significativamente o número de equações de restrição. Outro fato que deve ser considerado também é a grande complexidade envolvida na modelagem dos componentes da rede. Levando em conta estes aspectos, neste trabalho serão consideradas apenas as limitações físicas de potência ativa das máquinas. Assim, têm-se as seguintes restrições a serem satisfeitas:

$$\Delta P_{g_i}^{\min} \leq \Delta P_{g_i} \leq \Delta P_{g_i}^{\max}, \quad (i=1,2,\dots,n_g) \quad (3.4)$$

onde:

$$\Delta P_{g_i}^{\min} = P_{g_i}^o - P_{\max,i};$$

$$\Delta P_{g_i}^{\max} = P_{g_i}^o - P_{\min,i};$$

$P_{\min,i}, P_{\max,i}$ - limites de potência ativa da i -ésima máquina;

$$\Delta P_{g_i} = P_{g_i}^o - P_{g_i}^r, \text{ redespacho de geração para a } i\text{-ésima máquina};$$

$P_{g_i}^o$ - geração ativa atual da i -ésima máquina;

$P_{g_i}^r$ - geração ativa da i -ésima máquina após o redespacho.

3.4.3. Equação do balanço de potência

Desprezando as variações nas perdas de potência ativa do sistema, o somatório dos redespachos feitos deve ser nulo, ou seja:

$$\sum_{i=1}^{n_g} \Delta P g_i = 0 \quad (3.5)$$

onde $\Delta P g_i$ é o redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina.

3.4.4. Função objetivo

Como a condição inicial do sistema é obtida de um processo de otimização dos recursos energéticos, na função objetivo devem ser penalizadas as variações de grande magnitude a partir da solução inicial [14,15]. A forma analítica desta função objetivo é dada por:

$$f(\Delta P g_i) = \sum_{i=1}^{n_g} \alpha_i (\Delta P g_i)^2 \quad (3.6)$$

onde, α_i é o fator de ponderação ou penalidade da i -ésima máquina.

Com esta função objetivo, em geral, o processo de otimização tenderá a atribuir os maiores incrementos de potência às máquinas correspondentes aos menores valores de ponderação [15].

Diferentes alternativas podem ser empregadas na escolha dos fatores de ponderação α_i . Em [1], foram escolhidos como mais indicados os fatores de ponderação que combinam os custos incrementais e a sensibilidade na segurança, definidos como:

$$\alpha_i = \beta_i \left(\frac{d\eta_T}{d\Delta P g_i} \right)^{-1}$$

onde:

β_i - custo incremental da i -ésima máquina;

$(d\eta_T/d\Delta P g_i)^{-1}$ - sensibilidade da margem “global” do sistema às variações de geração ativa na i -ésima máquina.

Desta forma, para máquinas com igual custo incremental, o redespacho dará prioridade à máquina mais efetiva. Para máquinas com igual efetividade, o redespacho dará prioridade à máquina com menor custo.

Antes de apresentar em forma sintética o problema de otimização completo, serão definidas a margem “global” do sistema e a sensibilidade da segurança do sistema às variações na geração de cada máquina.

3.4.5. A margem “Global” e a sensibilidade da segurança do sistema

Seja $\{M\}$ o conjunto das m contingências mais severas, nas quais $\eta_k \leq \eta_{min}$ ($k=1,2,\dots,m$). Então, a margem “global” do sistema, η_T , é definida sob o conjunto $\{M\}$ como:

$$\eta_T = \sum_{k=1}^m \eta_k \quad (3.7)$$

Utilizando as equações (3.2) e (3.3), a nova margem de segurança “global” e sua sensibilidade, devido à variação na i -ésima máquina, podem ser calculadas respectivamente pelas seguintes expressões.

$$\eta_T = \sum_{k=1}^m \left[\eta_k^o + S_{k,P_{ms,k}} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i + \frac{1}{2} S_{k',P_{ms,k}} \left(\Gamma_{k,i} \Delta P g_i \right)^2 \right] \quad (3.8)$$

$$SG_i = \frac{\Delta \eta_T}{\Delta P g_i} = \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} \left[S_{k,P_{ms,k}} + \Delta P g_i S_{k',P_{ms,k}} \right] \quad (3.9)$$

onde:

$\Gamma_{k,i}$ = -1 : se a máquina i pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência;
0 : se a máquina não pertence ao conjunto crítico;

SG_i - sensibilidade da margem “global” a variações na geração da máquina i .

3.4.6. O problema de otimização completo

Assim, a formulação completa do problema de otimização para a melhoria da segurança dinâmica dos SEP, foi escrita como [1]:

$$\text{Minimizar } f(\Delta Pg_i) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\frac{\beta_i (\Delta Pg_i)^2}{SG_i} \right] \quad (3.10)$$

sujeito a:

$$\begin{cases} n_k^o + S_{k,Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i + \frac{1}{2} S_{k,Pms_k}^2 \left(\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i \right)^2 \geq n_{min}; & k = 1, 2, \dots, m \\ \Delta Pg_i \leq \Delta Pg_i^{max}; & i = 1, 2, \dots, n_g \\ \Delta Pg_i \geq \Delta Pg_i^{min}; & i = 1, 2, \dots, n_g \\ \sum_{i=1}^{n_g} \Delta Pg_i = 0 \end{cases} \quad (3.11)$$

onde:

n_g - número de geradores do sistema;

m - número de contingências;

β_i - custo incremental da i -ésima máquina;

SG_i - sensibilidade da margem “global”, em relação às variações na geração da i -ésima máquina (equação (3.9));

η_k^o - margem de segurança atual da k -ésima contingência;

η_{min} - margem de segurança mínima requerida no sistema;

S_{k,Pms_k} - coeficiente de sensibilidade de primeira ordem, da margem da k -ésima contingência, em relação à potência gerada no seu conjunto crítico;

$S_{k,Pms,k}$ - coeficiente de sensibilidade de segunda ordem, da margem da k -ésima contingência, em relação à potência gerada no seu conjunto crítico;

$\Gamma_{k,i}$ = -1 : se a máquina i pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência;

0 : se a máquina i não pertence ao conjunto crítico;

$\Delta Pg_i^{min} = Pg_i^o - Pmax_i$;

$\Delta Pg_i^{max} = Pg_i^o - Pmin_i$;

$Pmin_i$ - geração mínima técnica de potência ativa do i -ésimo gerador;

$Pmax_i$ - geração máxima técnica de potência ativa do i -ésimo gerador;

ΔPg_i - $Pg_i^o - Pg_i^r$, redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina;

Pg_i^o - geração ativa atual da i -ésima máquina;

Pg_i^r - geração ativa da i -ésima máquina após o redespacho.

Com o problema formulado, o próximo passo é escolher qual método utilizar na solução. Em [1] foram desenvolvidos dois métodos heurísticos para resolver o problema de otimização, descritos em detalhes no próximo item.

3.5. Métodos de Solução já Desenvolvidos

Em [1] foi desenvolvida uma metodologia denominada de ACUCSO (Ações de Controle Utilizando Coeficientes de Sensibilidade do OMIB) para resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica de SEP via redespacho de potência ativa.

No problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado como um problema de otimização, foram utilizadas duas estratégias heurísticas de solução: o ACUCSO para a pior contingência e o ACUCSO simultâneo.

Nos próximos itens são abordados estes dois métodos implementados em [1].

3.5.1. O ACUCSO para a pior contingência

Nesta estratégia, os custos incrementais de geração não são considerados e procura-se aumentar a margem da contingência com menor margem de segurança (a pior contingência) do conjunto $\{M\}$, composto pelas m contingências nas quais $\eta_k \leq \eta_{min}$ ($k=1,2,...,m$). A solução é baseada nos seguintes passos principais:

- i. Encontrar no conjunto $\{M\}$ a contingência com menor margem de segurança;*
- ii. Calcular com a equação (2.37), a variação de geração ΔP_m , requerida no conjunto de máquinas críticas desta contingência, para se levar a margem ao valor mínimo especificado;*
- iii. Distribuir ΔP_m , entre as máquinas dos conjuntos S e A da pior contingência em proporção à margem de regulação de cada máquina.*

Após a distribuição de ΔPm_s , é feita uma nova avaliação da estabilidade transitória. Assim forma-se um processo iterativo até tornar vazio o conjunto $\{M\}$.

Embora os redespachos sejam calculados para a pior contingência, as contingências com margem inferior a 105% da margem mínima requerida, η_{min} , são levadas em conta. Isso é feito no passo *iii* ao não permitir que as máquinas de seus conjuntos críticos possam aumentar geração (são bloqueadas).

A margem de regulação negativa, MRN , é utilizada nas máquinas que baixam geração (conjunto S) e a margem de regulação positiva, MRP , nas máquinas que aumentam (conjunto A).

Este método não assegura a determinação dos melhores redespachos do ponto de vista da efetividade na melhoria da margem de segurança e da otimização dos recursos energéticos do sistema, mas é uma forma simples de se identificar e quantificar ações de controle.

3.5.2. O ACUCSO simultâneo

A segunda estratégia do ACUCSO corrige de forma simultânea o conjunto de contingências com margem menor que a mínima ($\eta_k < \eta_{min}$, $k=1,2,\dots,m$), considerando os custos incrementais de geração, a sensibilidade da margem “global” e a interação entre as contingências e os redespachos. O ACUCSO simultâneo estabelece um processo iterativo local que procura identificar e quantificar os melhores redespachos de geração.

Na fase de identificação das melhores ações de controle, o algoritmo desenvolvido leva em conta os custos incrementais e a sensibilidade da margem “global” para cada máquina. Na fase de quantificação, as equações (2.36) e (2.37) foram utilizadas dentro de um processo iterativo local.

3.5.2.1. Identificação das ações de controle

A filosofia do ACUCSO simultâneo está baseada nas seguintes hipóteses:

- i. *Toda variação de geração numa máquina deve ser compensada por uma outra;*
- ii. *Para um par de máquinas, i e j ($i, j=1, 2, \dots, n_g$), a realocação de geração considera diminuição na i -ésima máquina e aumento na j -ésima;*
- iii. *Para um sistema com n_g máquinas existe um total de $n_g (n_g-1)$ realocações teoricamente possíveis;*
- iv. *A realocação entre as máquina i e j ($i, j=1, 2, \dots, n_g$) é viável, quando as duas máquinas possuem margem de regulação negativa e positiva respectivamente. Isto é, se $MRN_i > 0$ e $MRP_j > 0$, a realocação é viável;*
- v. *A toda realocação estarão associados um custo e uma variação na margem “global” do sistema, que podem ser quantificados;*
- vi. *As melhores realocações correspondem às que combinam o menor custo e a maior efetividade na margem “global”;*
- vii. *Estabelecendo um fator que pondere os aspectos de economia e efetividade, será possível classificar e ordenar as $n_g (n_g-1)$ realocações teoricamente possíveis.*

Baseado nestas idéias são definidos três fatores de penalidade ou ponderação, apresentados a seguir:

Fator de custo das realocações:

Para cada realocação entre as máquinas i e j ($i, j=1, 2, \dots, n_g$), o custo da realocação, o custo incremental e o fator de custos são assim definidos:

$$\begin{aligned}
 CR_{ij} &\triangleq CIR_{ij} \cdot \Delta P_{g_{ij}} \\
 CIR_{ij} &\triangleq (\alpha_j - \alpha_i) \\
 FCIR_{ij} &\triangleq CIR_{ij} / \max |CIR_{ij}|
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

onde:

- CR_{ij} - custo da realocação entre as máquinas i e j ;
- CIR_{ij} - custo “incremental” da realocação entre as máquinas i e j ;

- ΔPg_{ij} - variação de geração entre as máquinas i e j ;
 $\max|CIR_{ij}|$ - valor absoluto da realocação de maior custo “incremental”;
 α_i - custos incrementais da i -ésima máquina na qual diminui-se a geração;
 α_j - custos incrementais da j -ésima máquina na qual aumenta-se a geração;
 $FCIR_{ij}$ - valor absoluto da realocação de maior custo “incremental”.

Se $CIR_{ij} > 0$ a realocação estará afastando o sistema do despacho ótimo, e se $CIR_{ij} < 0$ a realocação produz um ganho na otimização do sistema. Sempre que o despacho inicial for resultado de um processo de otimização hidrotérmico, a segunda situação corresponde a uma realocação inviável.

No caso de ser viável, o despacho original pode não corresponder com um caso otimizado, ou o problema de melhoria de segurança não está considerando todas as restrições adotadas no processo de otimização hidrotérmico. Então, o custo de operação do sistema com o redespacho para garantir a segurança dinâmica, poderia ser menor que o custo do despacho original.

Fator de efetividade das realocações:

A efetividade na margem “global” do sistema, devido à realocação entre as máquinas i e j , pode ser quantificada utilizando a equação (3.9). Desconsiderando os coeficientes de segunda ordem, a efetividade e o fator de efetividade são definidos pelas equações (3.13) e (3.14), respectivamente.

$$SG_{ij} \triangleq \frac{d\eta_T}{d\Delta Pg_{ij}} = \sum_{k=1}^m (\Gamma_{k,i} - \Gamma_{k,j}) S_{k,P_{m,k}} \quad (3.13)$$

$$FSG_{ij} \triangleq SG_{ij} / \max|SG_{ij}| \quad (3.14)$$

onde:

- SG_{ij} - sensibilidade da margem “global” à realocação de geração entre as máquinas i e j
 $\Gamma_{k,i}$ = -1 : se a máquina i pertence ao conjunto crítico da contingência k ,
 0 : em caso contrário;

- $\Gamma_{k,j}$ = -1 : se a máquina j pertence ao conjunto crítico da contingência k ;
 0 : em caso contrário;
 $S_{k,Pmsk}$ - coeficiente de sensibilidade de primeira ordem, da margem da contingência k , em relação à potência gerada no conjunto crítico;
 FSG_{ij} - fator de sensibilidade da realocação entre as máquinas i e j ;
 $\max|SG_{ij}|$ - sensibilidade de maior valor absoluto.

Na equação (3.13), se as máquinas i e j pertencem ao mesmo conjunto (S ou A) da k -ésima contingência, a sua efetividade será nula. Antes de calcular cada valor de SG_{ij} , a viabilidade da realocação deve ser testada.

Fator global da realocação:

Os melhores redespachos serão obtidos com as realocações de menor custo e de maior efetividade. Assim, utiliza-se um índice que leve em conta os dois aspectos simultaneamente. O fator global de cada realocação i - j ($i, j=1, 2, \dots, n_g$) é definido como:

$$FGR_{ij} \triangleq FCIR_{ij} / FSG_{ij} \quad (3.15)$$

Na hora de compor os fatores FGR_{ij} , as realocações com fator de sensibilidade negativa ou nula ($SG_{ij} \leq 0$) são desconsiderados. Ou seja, as realocações que pioram a margem de segurança “global”, as que não produzem efeito nenhum e as inviáveis, não são levadas em conta na classificação.

Ordenando em forma ascendente os fatores FGR_{ij} , classificados, se terá uma lista das melhores realocações viáveis no sistema, para corrigir a segurança dinâmica do sistema. Isto encerra a fase de identificação das melhores ações de controle.

3.5.2.2. Quantificação das ações de controle

Tomando a lista ordenada dos fatores globais FGR_{ij} das realocações finalmente classificadas, procura-se no conjunto $\{M\}$ a contingência com menor margem de segurança, na qual a i -ésima máquina pertence ao conjunto crítico ($i \in S$) e a j -ésima máquina não pertence ($j \in A$). Então, utilizando a equação (2.37), rescrita em (3.16), calcula-se a quantidade de geração requerida a se baixar no conjunto S , ΔPm_s , para se obter a margem mínima na contingência.

$$\Delta P_{ms} = \frac{-S_{P_{ms}^0} \pm \sqrt{S_{P_{ms}^0}^2 + 2S_{P_{ms}^0}' \Delta \eta}}{S_{P_{ms}^0}'} \quad (3.16)$$

Como o par de máquinas escolhidas para o redespacho corresponde à melhor alternativa que combina os aspectos de custos e efetividade, o ΔP_{ms} calculado seria implementado totalmente se as margens de regulação das máquinas o permitissem. Para levar em conta esta restrição, a quantidade de geração finalmente realocada corresponde ao menor valor absoluto entre ΔP_{ms} , MRN_i e MRP_j , expresso como:

$$\Delta Pm = \min \text{ABS} \{ \Delta P_{ms} ; MRN_i ; MRP_j \}$$

Deve ser destacado que o valor de ΔPm implementado é sempre obtido usando os coeficientes de sensibilidade de segunda ordem e apenas na identificação das melhores realocações é que se faz aproximação de primeira ordem.

3.6. Comentários

Neste capítulo foi apresentado a formulação do problema da melhoria da segurança dinâmica de SEP como um problema de otimização. Essa formulação possui uma função objetivo que é função dos redespachos de geração ativa de cada máquina e as equações de restrições são compostas pelas restrições de estabilidade transitória, restrições das limitações físicas das máquinas e pela restrição de balanço de potência ativa. Com isso, pretende-se minimizar o desvio do ponto de operação do sistema, levando-o para uma nova condição na qual todas as restrições sejam satisfeitas.

Foram também apresentados os dois métodos heurísticos de solução desenvolvidos em [1], ou seja, o ACUCSO para a pior contingência, que não considera os custos incrementais de geração e procura aumentar a margem da contingência com menor margem de segurança, e o ACUCSO simultâneo que considera os custos incrementais de geração, a sensibilidade da margem “global” e a interação entre as contingências e os redespachos.

No próximo capítulo são apresentadas duas novas metodologias, utilizando técnicas de otimização, para resolver o problema de otimização formulado e como estas foram implementadas. No capítulo subsequente, será feita uma avaliação para comparar os resultados dos algoritmos implementados com os resultados obtidos com os métodos heurísticos descritos neste capítulo, para fins de comparação de desempenho.

CAPÍTULO 4

Solução do Problema da Melhoria da Segurança Dinâmica por Otimização

4.1. Introdução

Problemas que procuram maximizar ou minimizar uma função numérica, conhecida como função objetivo, de uma ou mais variáveis, onde as variáveis estão sujeitas a determinadas restrições, podem ser chamados de problemas de otimização.

O objetivo da otimização é encontrar a melhor solução, entre todas as soluções em potencial, de um determinado problema. Com esta finalidade e conforme descrito no capítulo anterior, o problema da melhoria da segurança dinâmica foi formulado como um problema de otimização com o objetivo de provocar o menor desvio possível em relação ao ótimo do ponto de vista da operação em regime permanente. Contudo, foram utilizadas apenas soluções heurísticas [1].

Neste capítulo é apresentada uma reformulação do problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado em [1] como um problema de programação não-linear, a fim de escrevê-lo como um problema de programação quadrática e programação linear. Assim, é apresentada toda a formulação matemática necessária para este desenvolvimento, os métodos utilizados e sua implementação.

4.2. Classificação dos Problemas de Otimização

As principais diferenças em relação aos tipos de problemas de otimização estão vinculadas às características matemáticas da função objetivo e das restrições, isto é, linear ou não-linear, contínua ou discreta e assim por diante. Outras diferenças são relativas a fatores tais como: dimensão do problema no qual o método de otimização é aplicado, precisão requerida, etc. A lista a seguir mostra uma classificação típica dos problemas de otimização, baseada na natureza das funções do problema.

1. Função objetivo linear, restrições lineares;
2. Função objetivo não-linear, restrições lineares;
3. Função objetivo não-linear, restrições não-lineares;
4. Função objetivo linear, restrições não-lineares.

Os problemas de otimização, em geral, são enquadrados num destes quatro itens. Quanto à técnica de solução de cada tipo de problema, as seguintes observações podem ser feitas:

- Problemas de otimização do tipo 1 são usualmente resolvidos por técnicas de Programação Linear baseadas no método Simplex ou Pontos Interiores;
- A solução dos problemas do tipo 2 é freqüentemente determinada levando-se em conta as características da função objetivo. Se esta é não-linear e possui uma forma analiticamente bem definida, então algoritmos específicos para problemas com função objetivo não-linear e restrições lineares são utilizados. No caso de funções objetivo quadráticas, por exemplo, técnicas de Programação Quadrática podem ser utilizadas.
- Problemas do tipo 3 são certamente os mais difíceis de serem resolvidos. Tipicamente, a menos que as funções envolvidas possuam características que permitam um tratamento em que a sua forma primitiva seja levada em consideração, a solução de tais problemas é encontrada resolvendo-se uma sequência de problemas simplificados que levam a solução original.

Os métodos de Newton e Lagrangeana Aumentada (entre outros) têm sido recomendados para a solução de tais problemas.

- A solução de problemas do tipo 4 é quase tão difícil de ser obtida quanto a dos problemas do tipo 3, em virtude da não-linearidade do freqüentemente grande número de restrições envolvidas. Em geral, o Método Simplex Convexo é aplicado para solução de problemas deste tipo.

O problema de melhoria da segurança dinâmica, formulado em [1] como um problema de otimização e rescrito abaixo, possui a seguinte forma:

$$\text{Minimizar} \quad f(\Delta P g_i) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\frac{\beta_i (\Delta P g_i)^2}{S G_i} \right] \quad (4.1)$$

sujeito a:

$$\begin{cases} n_k^o + S_{k, Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i + \frac{1}{2} S_{k, Pms_k}^2 \left(\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \right)^2 \geq n_{min}; & k = 1, 2, \dots, m \\ \Delta P g_i \leq \Delta P g_i^{max}; & i = 1, 2, \dots, n_g \\ \Delta P g_i \geq \Delta P g_i^{min}; & i = 1, 2, \dots, n_g \\ \sum_{i=1}^{n_g} \Delta P g_i = 0 \end{cases} \quad (4.2)$$

Analisando as equações, observa-se que o problema de otimização é do tipo 3, possuindo uma função objetivo não-linear com restrições também não-lineares. Como foi mencionado, este tipo de problema são os mais difíceis de serem resolvidos. Em [1] este problema de otimização foi resolvido utilizando um algoritmo heurístico implementado de duas formas diferentes. Neste trabalho o problema de otimização não é resolvido como um problema do tipo 3, contudo é reformulado de duas formas diferentes, a fim de ser classificado como sendo do tipo 1 e 2, onde serão utilizadas duas técnicas numéricas de otimização. Este assunto será abordado em detalhes nos próximos itens.

4.3. Métodos de Otimização Utilizados

Com a finalidade de comparar e avaliar os desempenhos das metodologias, o problema de otimização será reformulado para assumir as características de problemas de programação linear e não-linear. As alterações necessárias na formulação original do problema são apresentadas a seguir.

4.3.1. Formulação usando programação quadrática

Existem diversas técnicas de solução envolvendo programação não-linear. A escolha da técnica numérica a ser utilizada está fortemente relacionada à forma da função objetivo. A função objetivo do problema de otimização foi ponderada para levar em conta os fatores de custo de geração e a sensibilidade da potência ativa em relação a margem de segurança de cada contingência. Em geral, este tipo de função é representada por polinômios de segunda ordem, ou por uma função linear (ou linear-segmentada) [15]. No problema de otimização formulado, verifica-se que a função objetivo possui polinômios de segunda ordem no numerador. Se o denominador da função objetivo e as restrições forem lineares, uma das possibilidades, então, seria resolver utilizando programação quadrática.

A programação quadrática representa uma classe especial da programação não-linear em que a função objetivo é quadrática e as restrições são lineares. Assim serão necessárias algumas alterações na função objetivo e nas restrições não-lineares. Este assunto será tratado nos próximos sub-itens.

4.3.1.1. Função objetivo

O denominador da função objetivo é composto pelo termo SG_i , que é a sensibilidade da margem “global” a variações na geração da máquina i , definido como:

$$SG_i = \frac{\Delta d\eta_T}{d\Delta Pg_i} = \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} \left[S_{k,P_{ms,k}} + \Delta Pg_i S'_{k,P_{ms,k}} \right] \quad (4.3)$$

$$\text{onde } \eta_T = \sum_{k=1}^m \left[\eta_k^o + S_{k,P_{ms,k}} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i + \frac{1}{2} S'_{k,P_{ms,k}} (\Gamma_{k,i} \Delta Pg_i)^2 \right]$$

A expressão da margem global η_T é resultado de uma expansão em série de Taylor até a segunda ordem, onde ΔPg_i é variável. Considerando a expansão apenas até a primeira ordem, ΔPg_i é eliminado, o denominador assume um novo valor e a função objetivo então é reescrita da seguinte forma:

$$f(\Delta Pg_i) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\frac{\beta_i (\Delta Pg_i)^2}{SG_i} \right] \quad (4.4)$$

$$\text{com } SG_i = \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} S_{k,P_{ms,k}} \quad (4.5)$$

Com isso, a função objetivo agora é uma função quadrática.

A função objetivo considera como ponderações o custo incremental (β_i) e a sensibilidade da margem “global” a variações na geração (SG_i), não considerando as margens de regulação de cada máquina. Este aspecto foi considerado nas soluções heurísticas apresentadas em [1] e pode ser incorporado ao problema de otimização como uma nova ponderação χ_i onde:

$$\chi_i = \frac{1}{MRN_i}, \forall i \in S \quad \text{e} \quad \chi_i = \frac{1}{MRP_i}, \forall i \in A \quad \text{com } i = 1, 2, \dots, n_g \quad (4.6)$$

onde:

MRN_i = margem de regulação negativa representando a quantidade de geração ativa que a máquina i pode reduzir sem ultrapassar seu limite mínimo de geração;

MRP_i = margem de regulação positiva representando a quantidade de geração ativa que a máquina i pode aumentar sem ultrapassar seu limite máximo de geração.

As ponderações deverão ser utilizadas conforme a importância que cada uma exerce no problema analisado. Se forem utilizadas as três ponderações, as melhores

realocações corresponderão aquelas que combinem o menor custo, a maior efetividade e a maior margem de regulação negativa para as máquinas críticas ou positiva para as máquinas não críticas.

4.3.1.2. Restrições

As equações que representam as restrições de estabilidade transitória são não-lineares e precisam ser alteradas para se ter um problema de programação quadrática. No capítulo anterior foi apresentado que as restrições de estabilidade transitória possuem a seguinte forma:

$$\eta_k^o + S_{k,Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i + \frac{1}{2} S'_{k,Pms_k} \left(\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \right)^2 \geq \eta_{min} \quad k = 1, \dots, m \quad (4.7)$$

Sendo que: $\Delta P m_{s,k} = \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i$

Visando minimizar os efeitos obtidos das linearizações de funções não-lineares, propõe-se substituir $\Delta P m_{s,k}$ na equação (4.7), reescrevendo-a da seguinte forma:

$$\frac{1}{2} S'_{k,Pms_k} \Delta P m_{s,k}^2 + S_{k,Pms_k} \Delta P m_{s,k} + (n_k^o - n_{min}) \geq 0 \quad (4.8)$$

As raízes da equação quadrática são:

$$\begin{aligned} \Delta P m_{s,k,1} &= \frac{-S_{k,Pms_k} + \sqrt{S_{k,Pms_k}^2 - 2S'_{k,Pms_k}(n_k^o - n_{min})}}{S'_{k,Pms_k}} \\ \Delta P m_{s,k,2} &= \frac{-S_{k,Pms_k} - \sqrt{S_{k,Pms_k}^2 - 2S'_{k,Pms_k}(n_k^o - n_{min})}}{S'_{k,Pms_k}} \end{aligned} \quad (4.9)$$

O intervalo de solução envolvendo estas duas raízes depende exclusivamente do sinal do coeficiente de sensibilidade de segunda ordem (S'_{k,Pms_k}), que define se a parábola descrita pela equação (4.8) é convexa ($S'_{k,Pms_k} > 0$) ou côncava ($S'_{k,Pms_k} < 0$). Assim, considerando $\Delta P m_{s,k,2} < \Delta P m_{s,k,1}$ para fins de ilustração, pode-se ter as seguintes representações gráficas, respectivamente:

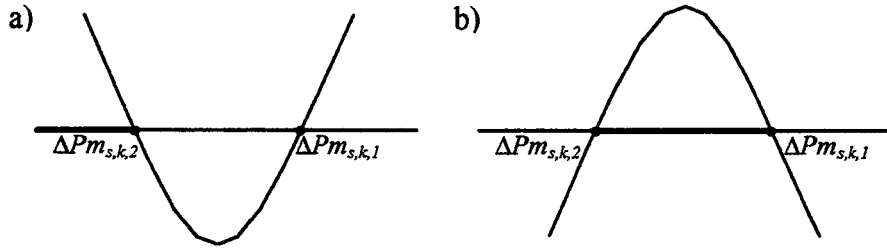


Figura 4.1 Parábolas descritas pela equação (4.8)

Assim, os intervalos de solução da equação (4.8), para estes casos, são:

a) $(-\infty, \Delta Pm_{s,k,2}]$ e $[\Delta Pm_{s,k,1}, +\infty)$;

b) $[\Delta Pm_{s,k,2}, \Delta Pm_{s,k,1}]$.

Não há como definir os dois intervalos apresentados na letra “a” como restrição no sistema linearizado, já que são excludentes. Como as ações de controle devem reduzir a potência ativa das máquinas críticas, sendo que $\Delta Pm_{s,k}$ é a variação de geração do conjunto das máquinas críticas da contingência analisada, então escolheu-se apenas o primeiro intervalo da letra “a” como solução. A nova equação de restrição será:

a) $\Delta Pm_{s,k} \leq \Delta Pm_{s,k,2}$

b) $\Delta Pm_{s,k,2} \leq \Delta Pm_{s,k} \leq \Delta Pm_{s,k,1}$

Substituindo o valor de $\Delta Pm_{s,k}$, para $k = 1, \dots, m$, tem-se:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i &\leq \Delta Pm_{s,k,2} & p/k \in C_1 \\ \Delta Pm_{s,k,2} &\leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \leq \Delta Pm_{s,k,1} & p/k \in C_2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

onde:

k - contingência analisada;

C_1 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola convexa;

C_2 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola côncava.

Nos casos em que o radicando das equações (4.9) é negativo, despreza-se o coeficiente de sensibilidade de segunda ordem $S'_{k, Pm_{s,k}}$ e a equação (4.7) torna-se naturalmente linear. Para estes casos, a equação de restrição será:

$$\eta_k^o + S_{k, Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \geq \eta_{min} \quad p/k \in C_3$$

onde:

C_3 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) possui um radicando negativo.

Com as alterações propostas, o problema de otimização passa a ter uma função objetivo não-linear com restrições lineares.

4.3.1.3. Formulação quadrática completa

O problema de programação quadrática completo pode ser escrito da seguinte forma:

$$\text{Minimizar } f(\Delta P g_i) = \sum_{i=1}^{n_g} [\alpha_i \cdot \Delta P g_i^2] \text{ com } \alpha_i = \frac{\beta_i \cdot \chi_i}{SG_i} \quad (4.11)$$

sujeito a:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \leq \Delta P m_{s,k,2} & p/k \in C_1 \\ \Delta P m_{s,k,2} \leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \leq \Delta P m_{s,k,1} & p/k \in C_2 \quad k = 1, 2, \dots, m \\ \eta_k^o + S_{k, Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta P g_i \geq \eta_{min} & p/k \in C_3 \\ \Delta P g_i \leq \Delta P g_i^{max}; \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\ \Delta P g_i \geq \Delta P g_i^{min}; \quad i = 1, 2, \dots, n_g \\ \sum_{i=1}^{n_g} \Delta P g_i = 0 \end{array} \right. \quad (4.12)$$

onde:

$\Delta P m_{s,k,1}$ - maior valor da somatória de redespatchos de potência ativa permitido para o conjunto crítico da contingência k , obtido pela equação (4.9), quando a equação de restrição de estabilidade transitória (equação (4.8)), pode ser representada por uma parábola côncava.

- $\Delta Pm_{s,k,2}$ - menor (maior) valor da somatória de redespachos de potência ativa permitido para o conjunto crítico da contingência k , obtido pela equação (4.9), quando a equação de restrição de estabilidade transitória (equação (4.8)), pode ser representada por uma parábola côncava (convexa).
- k - contingência analisada
- C_1 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola convexa;
- C_2 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola côncava;
- C_3 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) possui um radicando negativo;
- n_g - número de geradores (máquinas) do sistema;
- m - número de contingências críticas;
- β_i - custo incremental da i -ésima máquina;
- χ_i $= 1/MRN_i$ p/ $\forall i \in S$ e $1/MRN_i$ p/ $\forall i \in A$;
- MRN_i , MRP_i - Margem de regulação negativa e positiva de potência ativa para a máquina i , respectivamente;
- $\Gamma_{k,i}$ $=$ -1 : se a máquina i pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência;
 0 : se a máquina i não pertence ao conjunto crítico;
- SG_i $= \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} S_{k,P_{ms,k}}$, sensibilidade da margem “global”, em relação à variações na geração da i -ésima máquina;
- ΔPg_i^{min} $= Pg_i^o - Pmax_i$;
- ΔPg_i^{max} $= Pg_i^o - Pmin_i$;
- $Pmin_i$ - geração mínima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;
- $Pmax_i$ - geração máxima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;
- ΔPg_i - $Pg_i^o - Pg_i^r$, redespacho de geração ativa para a i -ésima máquina;
- Pg_i^o - geração ativa atual de potência ativa da i -ésima máquina;
- Pg_i^r - geração ativa da i -ésima máquina após o redespacho.

4.3.2. Formulação usando programação linear

O problema de otimização que apresenta a função objetivo e as restrições como funções lineares é definido como um problema de programação linear. Uma das principais vantagens da utilização das técnicas de programação linear é a rapidez na

determinação de soluções, facilidade de implementação e confiabilidade. A principal desvantagem associada às metodologias baseadas em programação linear é, em geral, a imprecisão resultante da linearização das funções objetivos [17] e equações de restrições.

Para a formulação linear do problema de otimização, será adotada uma representação da função objetivo como uma função linear-segmentada (ou linear por partes) [14,17,20,21], necessitando para isso algumas alterações na formulação original do problema, descritas nos próximos sub-itens.

4.3.2.1. Função objetivo

Para a formulação linear, a função objetivo quadrática desenvolvida no item anterior foi dividida em quatro segmentos, conforme mostra a Figura 4.2.

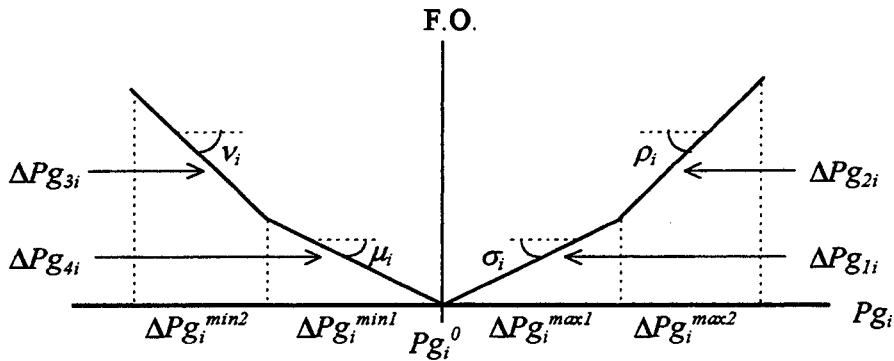


Figura 4.2 Representação da função objetivo linear-segmentada

As variações de geração, para cada segmento, são definidas da seguinte forma:

$$\begin{aligned}
 \Delta P_{g_i}^{\min 1} &\triangleq \lambda (P_{\max_i} - P_{g_i}^o) \\
 \Delta P_{g_i}^{\min 2} &\triangleq (1 - \lambda) (P_{\max_i} - P_{g_i}^o) \\
 \Delta P_{g_i}^{\max 1} &\triangleq \lambda (P_{g_i}^o - P_{\min_i}) \\
 \Delta P_{g_i}^{\max 2} &\triangleq (1 - \lambda) (P_{g_i}^o - P_{\min_i})
 \end{aligned}
 \quad 0 < \lambda < 1 \quad i=1,2,\dots,n_g \quad (4.13)$$

As variáveis v_i , ρ_i , μ_i e σ_i representam as inclinações de cada segmento da nova função objetivo e λ representa a porcentagem de potência ativa para cada segmento de reta da Figura 4.2.

Desdobrando-se a parcela da função objetivo, representada na Figura 4.2, em função de quatro outras variáveis, $\Delta P_{g_{1i}}$, $\Delta P_{g_{2i}}$, $\Delta P_{g_{3i}}$ e $\Delta P_{g_{4i}}$, relativas aos

incrementos positivos e negativos do redespacho de geração ativa da i -ésima máquina, obtém-se uma soma de quatro funções lineares que geram uma nova função objetivo, descrita a seguir:

$$f(\Delta Pg_{1i}, \Delta Pg_{2i}, \Delta Pg_{3i}, \Delta Pg_{4i}) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\alpha_i \cdot (\sigma_i \Delta Pg_{1i} + \rho_i \Delta Pg_{2i} + \nu_i \Delta Pg_{3i} + \mu_i \Delta Pg_{4i}) \right] \quad (4.14)$$

$$\text{com } \alpha_i = \frac{\beta_i \cdot \chi_i}{SG_i}$$

onde:

ΔPg_{1i} e ΔPg_{2i} - acréscimos negativos de geração ativa para a i -ésima máquina;

ΔPg_{3i} e ΔPg_{4i} - acréscimos positivos de geração ativa para a i -ésima máquina;

ν_i, ρ_i, μ_i e σ_i - inclinações dos segmentos da função objetivo;

β_i - custo incremental de geração ativa da i -ésima máquina;

$\chi_i = 1/MRN_i$ p/ $\forall i \in S$ e $1/MRN_i$ p/ $\forall i \in A$;

MRN_i, MRP_i - Margem de regulação negativa e positiva de potência ativa para a máquina i , respectivamente;

$\Gamma_{k,i} = -1$: se a máquina i pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência;

0 : se a máquina i não pertence ao conjunto crítico;

$SG_i = \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} S_{k,P_{ms,k}}$, sensibilidade da margem “global”, em relação às variações na geração da i -ésima máquina.

A variável sobre a qual está sendo feita a otimização não é mais ΔPg_i , mas $\Delta Pg_{1i}, \Delta Pg_{2i}, \Delta Pg_{3i}$ e ΔPg_{4i} . Assim, é necessário alterar também as equações de restrições.

4.3.2.2. Restrições

Com as novas variáveis de otimização:

$$Pg_i^r = Pg_i^o - (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \text{ e}$$

$$\Delta Pm_{s,k} = \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i})$$

Logo, as novas restrições são:

Restrições de Estabilidade Transitória:

$$\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta P g_{1i} + \Delta P g_{2i} - \Delta P g_{3i} - \Delta P g_{4i}) \leq \Delta P m_{s,k,2} \quad p/k \in C_1$$

$$\Delta P m_{s,k,2} \leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta P g_{1i} + \Delta P g_{2i} - \Delta P g_{3i} - \Delta P g_{4i}) \leq \Delta P m_{s,k,1} \quad p/k \in C_2$$

$$\eta_k^o + S_{k,Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta P g_{1i} + \Delta P g_{2i} - \Delta P g_{3i} - \Delta P g_{4i}) \geq \eta_{min} \quad p/k \in C_3$$

Restrições de Balanço de Potência:

$$\sum_{i=1}^{n_g} (\Delta P g_{1i} + \Delta P g_{2i} - \Delta P g_{3i} - \Delta P g_{4i}) = 0$$

Restrições das limitações físicas das máquinas:

$$0 \leq \Delta P g_{1i} \leq \Delta P g_i^{max1};$$

$$0 \leq \Delta P g_{2i} \leq \Delta P g_i^{max2};$$

$$0 \leq \Delta P g_{3i} \leq \Delta P g_i^{min1};$$

$$0 \leq \Delta P g_{4i} \leq \Delta P g_i^{min2};$$

$$i=1,2, \dots, n_g.$$

onde:

$$\Delta P g_i^{max1} = \lambda (P g_i^o - P min_i);$$

$$\Delta P g_i^{max2} = (1 - \lambda) (P g_i^o - P min_i);$$

$$\Delta P g_i^{min1} = \lambda (P max_i - P g_i^o);$$

$$\Delta P g_i^{min2} = (1 - \lambda) (P max_i - P g_i^o);$$

λ - porcentagem de potência para cada segmento da função objetivo, com $0 < \lambda < 1$;

$P min_i$ - geração mínima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;

$P max_i$ - geração máxima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;

$P g_i^o$ - geração atual de potência ativa da i -ésima máquina.

4.3.2.3. Formulação linear completa

A formulação completa do problema de otimização linear pode ser escrita como:

Minimizar

$$f(\Delta Pg_{1i}, \Delta Pg_{2i}, \Delta Pg_{3i}, \Delta Pg_{4i}) = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\alpha_i \cdot (\sigma_i \Delta Pg_{1i} + \rho_i \Delta Pg_{2i} + \nu_i \Delta Pg_{3i} + \mu_i \Delta Pg_{4i}) \right] \quad (4.15)$$

$$\text{com } \alpha_i = \frac{\beta_i \cdot \chi_i}{SG_i}$$

sujeito a:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \leq \Delta Pm_{s,k,2} & p / k \in C_1 \\ \Delta Pm_{s,k,2} \leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \leq \Delta Pm_{s,k,1} & p / k \in C_2 \\ \eta_k^o + S_{k,Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \geq \eta_{lmin} & p / k \in C_3 \\ 0 \leq \Delta Pg_{1i} \leq \Delta Pg_i^{min1} & k = 1, 2, \dots, m \\ 0 \leq \Delta Pg_{2i} \leq \Delta Pg_i^{min2} & \\ 0 \leq \Delta Pg_{3i} \leq \Delta Pg_i^{max1} & \\ 0 \leq \Delta Pg_{4i} \leq \Delta Pg_i^{max2} & \\ \sum_{i=1}^{n_g} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) = 0 & \end{array} \right. \quad (4.16)$$

onde:

ΔPg_{1i} e ΔPg_{2i} - acréscimos negativos de geração ativa para a i -ésima máquina;

ΔPg_{3i} e ΔPg_{4i} - acréscimos positivos de geração ativa para a i -ésima máquina;

ν_i , ρ_i , μ_i e σ_i - inclinações dos segmentos da função objetivo;

k - contingência analisada;

C_1 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola convexa;

C_2 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) é representada por uma parábola côncava;

C_3 - conjunto de contingências em que a equação (4.8) possui um radicando negativo;

- n_g - número de geradores (máquinas) do sistema;
 m - número de contingências críticas;
 β_i - custo incremental da i -ésima máquina;
 χ_i $= 1/MRN_i$ p/ $\forall i \in S$ e $1/MRN_i$ p/ $\forall i \in A$;
 MRN_i, MRP_i - Margem de regulação negativa e positiva de potência ativa para a máquina i , respectivamente;
 $\Gamma_{k,i}$ $=$ -1 : se a máquina i pertence ao conjunto crítico da k -ésima contingência;
 0 : se a máquina i não pertence ao conjunto crítico;
 SG_i $= \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} S_{k,P_{m,k}}$, sensibilidade da margem “global”, em relação à variações na geração da i -ésima máquina;
 $\Delta Pm_{s,k,1}$ - maior valor da somatória de redespachos de potência ativa permitido para o conjunto crítico da contingência k , obtido pela equação (4.9), quando a equação de restrição de estabilidade transitória (equação (4.8)), pode ser representada por uma parábola côncava;
 $\Delta Pm_{s,k,2}$ - menor (maior) valor da somatória de redespachos de potência ativa permitido para o conjunto crítico da contingência k , obtido pela equação (4.9), quando a equação de restrição de estabilidade transitória (equação (4.8)), pode ser representada por uma parábola côncava (convexa);
 ΔPg_i^{max1} $= \lambda(Pg_i^o - Pmin_i)$;
 ΔPg_i^{max2} $= (1 - \lambda)(Pg_i^o - Pmin_i)$;
 ΔPg_i^{min1} $= \lambda(Pmax_i - Pg_i^o)$;
 ΔPg_i^{min2} $= (1 - \lambda)(Pmax_i - Pg_i^o)$;
 λ - porcentagem de potência para cada segmento da função objetivo, com $0 < \lambda < 1$;
 $Pmin_i$ - geração mínima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;
 $Pmax_i$ - geração máxima técnica de potência ativa da i -ésima máquina;
 Pg_i^o - geração atual de potência ativa da i -ésima máquina.

4.4. Algoritmo Computacional

Um procedimento geral para a correção da segurança dinâmica de SEP, deve contemplar basicamente os seguintes passos:

- estabelecer um valor mínimo à margem de segurança (n_{\min}) do sistema;
- avaliar a segurança do sistema, ou seja, para uma lista de n contingências, encontrar o conjunto que não satisfaz o nível de segurança requerido ($n_k < n_{\min}$);
- identificar e quantificar ações de controle, para obter uma condição segura;
- encontrar e avaliar a nova condição de regime permanente do sistema.

Com base no processo descrito acima, foi desenvolvido em [1] um algoritmo iterativo que procura aproveitar as características de precisão e confiabilidade do método SLEP iterativo, no cálculo do tempo crítico e da margem de segurança, e as expressões analíticas dos coeficientes de sensibilidade da margem de segurança, obtidos do OMIB equivalente, na identificação e quantificação das ações de controle para a correção da segurança dinâmica. Os passos principais são apresentados a seguir:

- Calcular a condição de regime permanente (RP) do sistema;*
- Calcular com o SLEP iterativo o tempo crítico, a margem de segurança e os ângulos das máquinas no instante de cruzamento com a SLEP, t_{slep} , da última trajetória instável, para cada uma das contingências da lista;*
- Ordenar as contingências segundo a margem de segurança calculada pelo SLEP iterativo. Se para todas as contingências, $\eta_e > \eta_{\min}$, o processo é encerrado;*

- iv. *Determinar o conjunto crítico e seu respectivo OMIB equivalente, mediante a classificação das máquinas em t_{step} . Também são calculados, para cada contingência, os coeficientes de sensibilidade da margem de segurança;*
- v. *Identificar e quantificar ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica do tipo redespacho de potência ativa, utilizando os coeficientes de sensibilidade da margem de segurança. Este módulo é chamado de ACUCSO (Ações de Controle Utilizando os Coeficientes de Sensibilidade do OMIB);*
- vi. *Voltar ao passo i.*

Esse processo iterativo é interrompido quando o sistema não apresenta contingências com margem inferior a margem mínima, sendo totalmente seguro para as contingências analisadas, ou quando alcança o número máximo de iterações.

Em [1] o módulo ACUCSO, mencionado no item v, foi desenvolvido a partir de duas metodologias denominadas de ACUCSO para a pior contingência e ACUCSO simultâneo. Estas metodologias foram desenvolvidas a partir de métodos heurísticos utilizados para resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado como um problema de otimização. As duas metodologias foram abordados no item 3.4.

Neste trabalho foi utilizado o sistema computacional desenvolvido em [1] e implementado duas novas metodologias de resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica. Estas novas metodologias, adicionadas no módulo ACUCSO, quantificam as ações de controle do tipo redespacho de potência ativa, utilizando técnicas de otimização de programação quadrática e linear. Um fluxograma do algoritmo completo da metodologia implementada é apresentado na Figura 4.3.

Toda a formulação matemática desenvolvida para a implementação foi apresentada nos itens 4.3.1 e 4.3.2. O sistema computacional, desenvolvido em [1] foi convertido para ambiente UNIX, onde foram implementados os novos algoritmos, em linguagem fortran, utilizando as sub-rotinas da biblioteca de otimização OSL da IBM. No próximo item é apresentado uma descrição sucinta a biblioteca de otimização OSL. Maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice A.

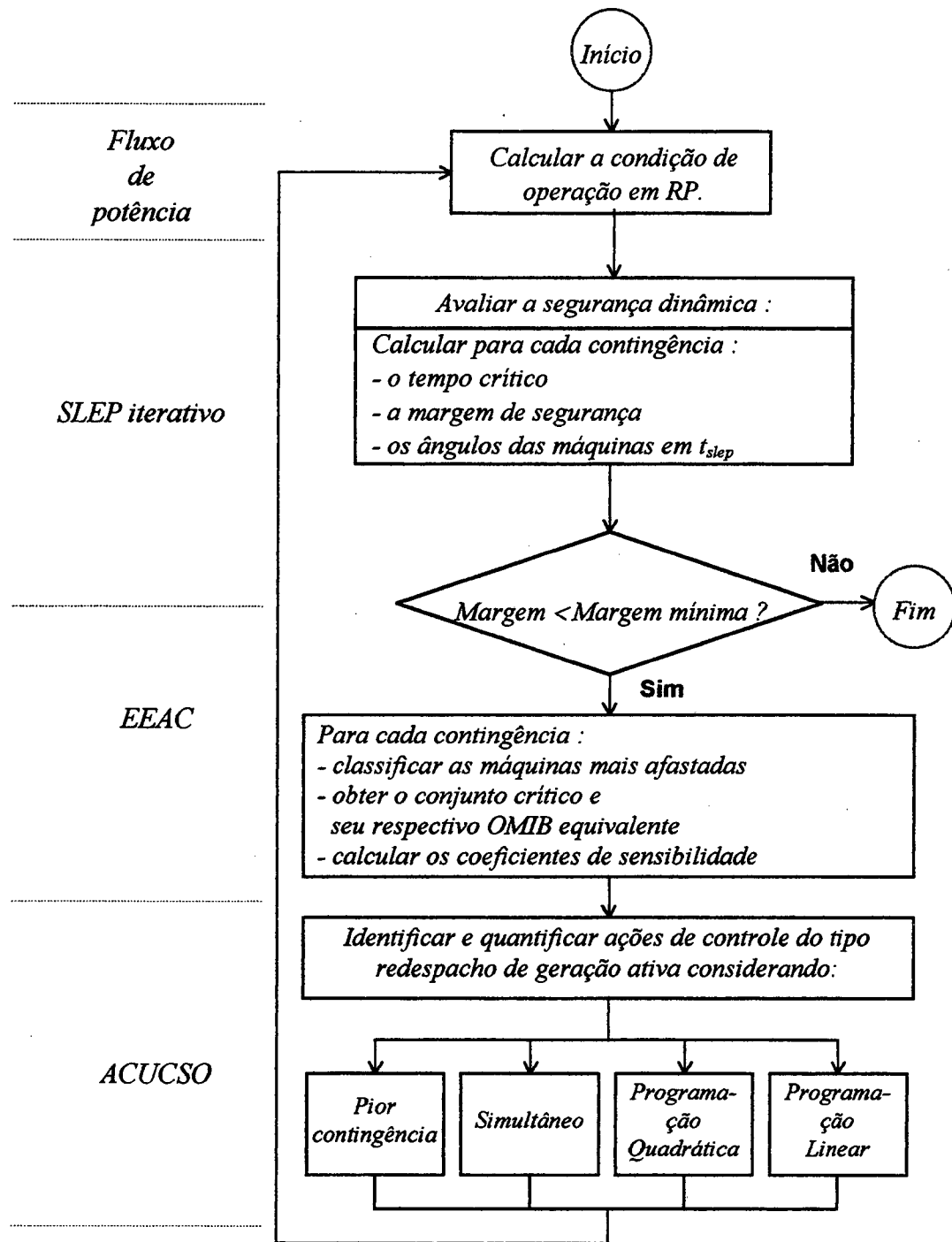


Figura 4.3 Fluxograma do algoritmo para avaliação e correção da segurança dinâmica dos SEP

4.4.1. Sub-rotinas de otimização utilizadas na implementação

A OSL - "Optimization Subroutine Library" [18], é uma coleção de sub-rotinas matemáticas da IBM, de alta performance, que resolvem problemas de otimização, onde se deseja minimizar ou maximizar uma função sujeita a um conjunto de

restrições. As sub-rotinas da OSL resolvem problemas de otimização formulados como problemas de programação linear (PL), programação inteira-mista (PIM) ou programação quadrática (QP). Para isso utiliza os seguintes métodos:

- Programação linear: métodos simplex, pontos interiores e fluxo em redes;
- Programação inteira-mista: método “branch-and-bound”;
- Programação quadrática: aproximação do método simplex;

Na implementação das novas metodologias foram utilizadas as sub-rotinas de programação quadrática e linear.

Para a programação linear, o método simplex e o método dos pontos interiores são os mais indicados para solucionar o problema de otimização. O algoritmo simplex procura pela solução ótima iniciando pelos vértices da região viável, como oposição para o método dos pontos interiores que procura a solução iniciando do interior e prosseguindo até os limites da região viável. Todos os dois métodos são confiáveis.

O método simplex é mais comumente utilizado para resolver problemas de programação linear, contudo, o método utilizado na implementação foi o método dos pontos interiores por dois motivos. Primeiro, o método dos pontos interiores tem se mostrado, nos últimos anos, como sendo computacionalmente mais eficiente [18]. Segundo, o método dos pontos interiores está disponível na versão serial e paralela da OSL, facilitando uma futura paralelização do programa. Adicionalmente, se a sub-rotina de solução pelo método dos pontos interiores não converge, o método de solução é alterado automaticamente para o simplex.

Foram implementadas também sub-rotinas de acoplamento de entrada e saída de dados para as sub-rotinas da OSL. As sub-rotinas da OSL foram utilizadas conforme exemplos apresentados no Apêndice A, para programação quadrática e linear.

4.4.2. Características da OSL

As sub-rotinas da OSL foram todas implementadas em linguagem FORTRAN, porém podem ser utilizadas em programas feitos nas linguagens C, FORTRAN, PL/I ou APL2.

O alto nível de suas sub-rotinas fornece uma grande capacidade para solucionar problemas de otimização, necessitando apenas detalhes de conhecimento de programação matemática. São fáceis de serem utilizadas, possuindo numerosos parâmetros de controle de variáveis.

A OSL pode ser executada em doze diferentes sistemas operacionais:

- Três sistemas operacionais da IBM: MVS, VM e AIX/ESA;
- Cinco sistemas operacionais de estações de trabalho: AIX, HP-UX, IRIX, SunOS e Solaris;
- Quatro sistemas operacionais de PC: DOS, OS/2, Windows e Windows NT.

4.4.2.1. A OSL paralela - OSLp

A OSLp - "Parallel Optimization Subroutine Library" [2] é um conjunto de sub-rotinas que inclui toda a capacidade da OSL serial, além do adicional benefício de resolver problemas de otimização linear e inteira-mista, utilizando técnicas de processamento paralelo.

As sub-rotinas da OSL paralela possuem também todas as características da OSL sequencial, podendo ser acessadas por programas feitos em linguagem FORTRAN, C ou C⁺⁺.

A OSLp oferece os seguintes benefícios:

- **Aumento de performance.** Em geral, a OSLp resolve grandes problemas de otimização mais rápido que se fossem executados em ambiente serial.
- **Resolução de grandes problemas.** A OSLp pode trabalhar com grandes problemas e maior número de dados do que a OSL em ambiente serial.

- **Facilidade no uso.** Algumas características que facilitam o seu uso:

- Todas as características e capacidades da OSL serial estão disponíveis na OSLp;
- Não é necessário ter conhecimento de como trabalhar com códigos de programação paralela para usar a OSLp. Com pequenas alterações nos programas seriais, pode-se executá-los em ambiente paralelo.
- As chamadas das sub-rotinas da OSLp são compatíveis com as chamadas de sub-rotinas da OSL serial, facilitando a adaptação de programas já existentes no modo serial.

A OSLp necessita dos seguintes software de comunicação, variando em função do hardware utilizado.

- **Computadores paralelos IBM/SP**

- IBM AIX Parallel Environment (PE);
- IBM AIX Parallel Virtual Machine Extended (AIX PVMe);
- Parallel Virtual Machine (PVM);

- **Estações de trabalho RISC System/6000**

- IBM AIX Parallel Environment (PE);
- Parallel Virtual Machine (PVM).

4.5. Comentários

Neste capítulo foi apresentada a reformulação do problema de melhoria da segurança dinâmica, formulado em [1] como um problema de programação não-linear, para que este fosse escrito como um problema de programação quadrática e programação linear. Foram abordados também aspectos relativos a implementação computacional e as sub-rotinas utilizadas.

Nas alterações que foram realizadas, houve a necessidade de reformular a função objetivo e as restrições, tanto para a programação quadrática quanto para a programação linear. Preocupou-se em manter o máximo a integridade do problema originalmente formulado, para que este não fugisse aos propósitos iniciais, ou seja, quantificar as melhores ações de controle para garantir a melhoria da segurança dinâmica dos SEP.

No próximo capítulo serão apresentados os experimentos computacionais realizados com diversos sistemas elétricos utilizando as novas metodologias desenvolvidas. Os resultados serão comparados com os resultados obtidos utilizando o método ACUCSO para a pior contingência e o método ACUCSO simultâneo.

CAPÍTULO 5

Experimentos Computacionais

5.1. Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos de experimentos computacionais com as metodologias propostas neste trabalho. Foram utilizados quatro sistemas de energia elétrica nos testes, sendo dois deles de grande porte e representando configurações do sistema interligado Sul-Sudeste do Brasil.

A apresentação dos resultados é feita em duas fases distintas, a saber:

Primeira fase: São apresentados a formulação do problema de melhoria da segurança dinâmica como um problema de programação quadrática e, posteriormente, como um problema de programação linear, para um equivalente do SEP do Sul do Brasil e constituído de 10 máquinas síncronas.

Segunda fase: São apresentados os resultados obtidos utilizando sistemas de pequeno e grande porte com o objetivo de verificar o desempenho dos novos algoritmos em diferentes sistemas. As avaliações são feitas a partir dos valores totais de redespachos de potência ativa, número de iterações, margens finais de segurança e tempos de CPU.

Nos três próximos itens são apresentados a estrutura final do programa computacional implementado, as características dos sistemas elétricos utilizados nos testes e os parâmetros utilizados nas simulações. Logo em seguida é apresentado em detalhes a quantificação dos redespachos para o Sistema Sul, que consiste na primeira fase da avaliação do desempenho. No item subsequente são apresentados os resultados considerando todos os sistemas testes e, por último, são apresentados os comentários.

5.2. Estrutura da Implementação Computacional

As implementações computacionais para a melhoria da segurança utilizam três programas computacionais básicos: programa de fluxo de potência, programa de análise da estabilidade e programa de identificação e quantificação das ações de controle. Estes três programas são independentes e compartilham informações entre si através de arquivos. Nos três passos seguintes é feita uma descrição das tarefas desempenhadas por estes programas, a partir de sua ordem de execução.

Passo 1: Inicialmente é determinado o ponto de operação do sistema em regime permanente utilizando um programa de fluxo de potência.

Passo 2: Em seguida é feita a análise das condições de segurança do sistema a partir do método SLEP iterativo. Calculam-se os tempos críticos para cada contingência simulada e os ângulos de cada máquina no momento de cruzamento da última trajetória instável com a SLEP.

Passo 3: Com os dados obtidos no passo anterior, é feita a identificação e quantificação de ações de controle do tipo redespacho de potência ativa. Esta fase pode ser dividida em duas partes: na primeira o sistema é reduzido ao OMIB equivalente para se determinar os coeficientes de sensibilidade e as margens de cada contingência, e na segunda parte calculam-se os melhores valores para o redespacho de potência ativa.

Na quantificação dos redespachos, feita no passo 3, podem-se utilizar quatro alternativas: redespacho para a pior contingência, redespacho simultâneo, redespacho por otimização utilizando programação quadrática e redespacho por otimização utilizando programação linear. Neste trabalho foram implementados o redespacho por otimização utilizando programação quadrática e programação linear. Para uma melhor análise do desempenho, seus resultados foram comparados com os resultados obtidos utilizando o redespacho para a pior contingência e o redespacho simultâneo.

5.3. Sistemas Elétricos

Para a realização dos testes computacionais foram utilizados nas simulações quatro sistemas elétricos de potência de dimensões diferentes e descritos a seguir:

Sistema Sul: Equivalente de uma configuração do sistema sul brasileiro cujo diagrama unifilar, parâmetros e condições de operação são encontrados na referência [1].

Sistema 188: Equivalente reduzido de uma configuração do sistema interligado das regiões sul e sudeste do Brasil.

Sistema 730: Configuração do sistema interligado das regiões sul e sudeste do Brasil, para o ano de 1987, com algumas subáreas representadas por equivalentes estáticos da rede.

Sistema 2000: Configuração relativamente atual do sistema interligado das regiões sul e sudeste do Brasil.

A Tabela 5.1 apresenta uma síntese dos parâmetros globais dos SEP utilizados, onde as quatro colunas descrevem, respectivamente, a denominação do sistema, o número total de barras, o número total de linhas de transmissão, transformadores e outros elementos série e o número de geradores representados dinamicamente. As gerações de pequeno valor foram transformadas em cargas negativas.

Tabela 5.1 Parâmetros dos SEP utilizados nas simulações

Denominação do Sistema	Nº de barras	Nº de linhas	Nº de geradores
Sistema Sul	45	72	10
Sistema 188	188	264	15
Sistema 730	730	1146	73
Sistema 2000	1916	2788	108

5.4. Parâmetros Utilizados nas Simulações

Como foi descrito anteriormente, as simulações envolvem três programas computacionais: o programa de fluxo de potência, o programa de análise da estabilidade e o programa de identificação e quantificação das ações de controle. Seguem-se a seguir os parâmetros utilizados em cada programa.

Fluxo de potência:

Utilizou-se uma tolerância de convergência do erro de potência ativa na barra de 0,1 MW e de potência reativa de 1,0 MVar.

Análise de estabilidade:

A análise da segurança dos sistemas foi realizada utilizando o método SLEP iterativo. Foram simuladas contingências do tipo curto-circuito trifásico sólido com posterior desligamento permanente de um elemento da rede (linha de transmissão ou transformador). Considera-se que o tempo de atuação da proteção é de 0,10 segundos (6 ciclos). Para o Sistema Sul e Sistema 188 foram simuladas 122 e 302 contingências, respectivamente. Este número de contingências corresponde a todas as contingências possíveis de ocorrer nestes sistemas (contingências simples, desconsiderando contingências duplas e triplas), sem provocar ilhamento de partes do sistema. Para o Sistema 730 e Sistema 2000 foram simuladas as 50 contingências mais severas, ou seja, que possuíam as menores margens de estabilidade. Os parâmetros utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 Parâmetros utilizados no SLEP

Descrição dos Parâmetros	Valor
Número de Termos da Série de Taylor	6 termos
Limite Máximo de Estimativas de Tempo Crítico	15 estimativas
Intervalo de Monitoração da Derivada Direcional	0,010 segundos
Intervalo de Renovação dos Coeficientes da Série	0,050 segundos
Tolerância de Convergência do Limite de Energia	99,0 %
Tolerância para a Detecção da SLEP	0,0010 segundos
Fator de Aceleração	70,0 %
Tempo Máximo de Simulação	2,0 segundos

Identificação e quantificação das ações de controle:

Para as ações de controle foram implementados os algoritmos para o redespacho por otimização, utilizando programação quadrática e programação linear, descritos no capítulo anterior. Foram utilizadas as restrições de estabilidade transitória para todas as contingências constantes nos dados de entrada e para apenas as contingências críticas (contingências com margem menor ou igual a 105% da margem mínima estipulada). Em todos os casos simulados foram obtidos os mesmos resultados. Em vista disto, todos os resultados das simulações apresentadas a seguir, inclusive os tempos computacionais, foram obtidos utilizando as restrições de estabilidade transitória apenas para as contingências críticas. Foi adotado um custo incremental de geração unitário para todas máquinas dos sistemas utilizados nas simulações.

5.5. Resultados Numéricos – Fase 1

Neste item apresenta-se, em detalhes, a aplicação das metodologias desenvolvidas para a melhoria da segurança dinâmica na quantificação dos redespachos do Sistema Sul. Será abordado o processo utilizado nas formulações usando programação quadrática e linear. O objetivo é mostrar as características dos dois

métodos e suas diferenças para uma melhor compreensão dos resultados gerais que serão apresentados nos próximos itens.

Nas Tabelas 5.3, 5.5 e 5.6 os valores de potência ativa são dados em MW. No desenvolvimento do problema de otimização, estes valores são convertidos em p.u. utilizando a base de 100 MVA.

Na Tabela 5.3 são dados o número da barra de geração e o equivalente número do gerador associado, a geração inicial e os limites máximos e mínimos do gerador e as margens de regulação negativa (*MRN*) e positiva (*MRP*), representando a quantidade de geração que pode ser diminuída ou aumentada, respectivamente, no gerador em questão. Foram utilizados limites mínimos de geração iguais a zeros para os geradores (excluindo os geradores 6,7 e 8) apenas para a validação das metodologias, já que na prática isto não é possível.

Tabela 5.3 Condição inicial das máquinas do Sistema Sul.

Nº do Gerador	Barra de Geração	Geração Inicial	Geração Máxima	Geração Mínima	<i>MRN</i>	<i>MRP</i>
1	366	1.250,00	1.860,00	0,00	1.250,00	610,00
2	369	15,00	260,00	0,00	215,00	45,00
3	373	1.010,00	1.020,00	0,00	1.010,00	10,00
4	381	1.450,00	1.860,00	0,00	1.450,00	410,00
5	390	1.325,00	1.402,00	0,00	1.325,00	77,00
6	392	90,00	111,00	60,00	30,00	21,00
7	394	120,00	156,30	80,00	40,00	36,30
8	395	241,00	312,00	200,00	41,00	71,00
9	397	1.354,70	1.402,00	0,00	1.354,70	47,30
10	407	490,00	556,00	0,00	490,00	66,00

Na Tabela 5.4 encontram-se, pela ordem, o número da contingência crítica analisada, a sua margem de segurança atual, o conjunto das máquinas críticas e o coeficiente de sensibilidade de primeira e segunda ordem. Deve ser lembrado que a margem de segurança especificada para o Sistema Sul é 0,30.

Tabela 5.4 Dados iniciais das contingências críticas do Sistema Sul

Contingência	Margem	Conj. Crítico	S_{k,Pms_k}	S'_{k,Pms_k}
1	-12,82	1	1,10	15,70
2	-1,93	1	-3,16	9,03
3	0,23	3	-0,94	0,60

5.5.1. Aplicação da programação quadrática

O problema de otimização tem como objetivo minimizar o desvio do ponto de operação inicial do sistema, levando-o para uma nova condição na qual todas as restrições estabelecidas sejam satisfeitas. A função objetivo e as restrições possuem as seguintes formas:

Função objetivo:

$$\text{Minimizar F.O.} = \sum_{i=1}^{n_g} [\alpha_i \cdot \Delta P g_i^2] \quad \text{com} \quad \alpha_i = \frac{\beta_i \cdot \chi_i}{SG_i} \quad (5.1)$$

onde χ_i e SG_i ($i = 1, 2, \dots, n_g$) foram definidas da seguinte forma:

$$\chi_i = \frac{1}{MRN_i} \quad p / \forall i \in S \quad \text{e} \quad \chi_i = \frac{1}{MRP_i} \quad p / \forall i \in A$$

$$SG_i = \sum_{k=1}^m \Gamma_{k,i} S_{k,P_{mr,k}}$$

O valor de $\Gamma_{k,i}$ é igual a “-1” quando a máquina i pertence ao conjunto das máquinas críticas da contingência k e “0” quando não pertence. Mas, quando uma determinada máquina não pertence ao conjunto crítico de nenhuma das contingências analisadas, o valor de SG_i seria igual a “0”. Isto implicaria em impossibilidade de solução da função objetivo, já que o termo SG_i se encontra no denominador. Nestes casos, adotou-se o valor “0,10” para SG_i .

Para os valores apresentados nas Tabelas 5.3 e 5.4, estas variáveis assumem os seguintes valores:

Nº do Gerador	χ_i	SG_i
1	0,0008	2,06
2	0,0222	0,10
3	0,0010	0,94
4	0,0024	0,10
5	0,0130	0,10

Nº do Gerador	χ_i	SG_i
6	0,0476	0,10
7	0,0275	0,10
8	0,0141	0,10
9	0,0211	0,10
10	0,0152	0,10

O valor do custo incremental β_i ($i = 1, 2, \dots, n_g$) foi considerado unitário para todos os geradores.

Com estes valores, a função objetivo da equação (5.1) tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{F.O.} = & 0,0004\Delta Pg_1^2 + 0,222\Delta Pg_2^2 + 0,0011\Delta Pg_3^2 + 0,024\Delta Pg_4^2 + 0,130\Delta Pg_5^2 \\ & + 0,476\Delta Pg_6^2 + 0,275\Delta Pg_7^2 + 0,141\Delta Pg_8^2 + 0,211\Delta Pg_9^2 + 0,152\Delta Pg_{10}^2 \end{aligned}$$

Restrições de estabilidade transitória:

A equação de restrição de estabilidade transitória, válida para todas as contingências, é reescrita a seguir:

$$\frac{1}{2} S'_{k, Pms_k} \Delta Pm_{s,k}^2 + S_{k, Pms_k} \Delta Pm_{s,k} + (n_k^o - n_{min}) \geq 0 \quad (5.2)$$

Relembrando o desenvolvimento apresentado no item 4.3.1.2., pode-se escrever:

- $\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i \leq \Delta Pm_{s,k,2}$, para $k \in C_1$,
- $\Delta Pm_{s,k,2} \leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i \leq \Delta Pm_{s,k,1}$, para $k \in C_2$ e
- $\eta_k^o + S_{k, Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} \Delta Pg_i \geq \eta_{min}$, para $k \in C_3$.

onde:

- k - contingência analisada;
- C_1 - conjunto de contingências em que a equação (5.2) é representada por uma parábola convexa;
- C_2 - conjunto de contingências em que a equação (5.2) é representada por uma parábola côncava;
- C_3 - conjunto de contingências em que a equação (5.2) possui um radicando negativo.

Todas as contingências analisadas pertencem ao conjunto C_1 . Os valores de $\Delta Pm_{s,k,1}$ e $\Delta Pm_{s,k,2}$ podem ser encontrados utilizando a seguinte equação:

$$\Delta Pm_{s,k} = \frac{-S_{k, Pms_k} \pm \sqrt{S_{k, Pms_k}^2 - 2S'_{k, Pms_k} (n_k^o - n_{min})}}{S'_{k, Pms_k}} \quad (5.3)$$

Utilizando os valores da Tabela 5.4, para a contingência 1, obtém-se:

$$\Delta Pm_{s,k} = \frac{-1,10 \pm \sqrt{1,10^2 - 2 \cdot 15,70 \cdot (-12,82 - 0,30)}}{15,70} \left\{ \begin{array}{l} \Delta Pm_{s,k,1} = +1,225 \\ \Delta Pm_{s,k,2} = -1,365 \end{array} \right.$$

Com estes valores, para a contingência 1, tem-se:

$$\Delta Pm_{s,k} \leq \Delta Pm_{s,k,2} \Rightarrow -\Delta Pg_1 \leq -1,365$$

Aplicando-se o mesmo procedimento para as demais contingências, obtém-se:

$$-\Delta Pg_1 \leq -0,435 \quad \text{e} \quad -\Delta Pg_3 \leq -0,076$$

Restrições de limitações dos geradores:

$$\Delta Pg_i^{min} \leq \Delta Pg_i \leq \Delta Pg_i^{max} \quad \text{onde}$$

$$\Delta Pg_i^{min} = Pg_i^o - Pmax_i \quad \text{e} \quad \Delta Pg_i^{max} = Pg_i^o - Pmin_i$$

Substituindo os valores da Tabela 5.3, encontram-se:

$$\begin{array}{llll} -6,10 & \leq \Delta Pg_1 \leq & 12,50 & -0,21 \leq \Delta Pg_6 \leq & 0,30 \\ -0,45 & \leq \Delta Pg_2 \leq & 2,15 & -0,36 \leq \Delta Pg_7 \leq & 0,40 \\ -0,10 & \leq \Delta Pg_3 \leq & 10,10 & -0,71 \leq \Delta Pg_8 \leq & 0,41 \\ -4,10 & \leq \Delta Pg_4 \leq & 14,50 & -0,47 \leq \Delta Pg_9 \leq & 13,55 \\ -0,77 & \leq \Delta Pg_5 \leq & 13,25 & -0,66 \leq \Delta Pg_{10} \leq & 4,90 \end{array}$$

Restrições de balanço de potência:

$$\sum_{i=1}^{10} \Delta Pg_i = 0$$

Com esta última equação de restrição, o problema de otimização para a programação quadrática fica completo. Resolvendo-o, encontram-se os valores dos redespachos iniciais, ou seja, os redespachos para a primeira iteração. Logo em seguida é utilizado o programa de fluxo de potência para encontrar o novo ponto de operação do sistema em regime permanente e sua estabilidade é novamente analisada. Se no sistema ainda houver pelo menos uma contingência com margem inferior a mínima estipulada, é formulado um novo problema de otimização para a condição atual do sistema e novos valores de redespachos são calculados. Este processo iterativo se repete até o momento

em que o sistema alcança a margem de segurança estipulada, ou seja, quando não há mais contingências com margem inferior a margem mínima ou até atingir o número máximo de iterações.

Os valores de potência ativa, em MW, dos redespachos obtidos em cada iteração, até alcançar a margem de segurança estipulada, bem como os valores totais de geração realocados por iteração e global, são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 Redespachos obtidos para o Sistema Sul utilizando programação quadrática

Gerador	1ª iteração	2ª iteração	3ª iteração	4ª iteração	5ª iteração	6ª iteração	Total
1	-136,48	-62,00	-23,01	-9,65	-1,43	-1,17	-233,74
2	8,38	3,84	1,35	0,58	0,10	0,13	14,38
3	-7,55	-4,23	-0,26	-0,29	-0,27	-1,10	-13,70
4	76,34	35,07	12,31	5,24	0,90	1,20	131,05
5	14,33	6,61	2,31	0,98	0,17	0,23	24,64
6	3,91	1,79	0,63	0,27	0,05	0,06	6,71
7	6,75	3,10	1,08	0,47	0,08	0,11	11,59
8	13,22	6,07	2,13	0,91	0,15	0,21	22,69
9	8,81	4,11	1,48	0,64	0,11	0,14	15,29
10	12,29	5,64	1,98	0,85	0,14	0,19	21,09
Total	144,03	66,23	23,27	9,94	1,70	2,27	247,44

5.5.2. Aplicação da programação linear

A função objetivo, representada por uma função linear segmentada, e as restrições para a programação linear possuem as seguintes formas:

Função objetivo:

$$F.O. = \sum_{i=1}^{n_g} \left[\alpha_i \cdot (\sigma_i \Delta P_{g_{1i}} + \rho_i \Delta P_{g_{2i}} + \nu_i \Delta P_{g_{3i}} + \mu_i \Delta P_{g_{4i}}) \right] \quad \text{com} \quad \alpha_i = \frac{\beta_i \cdot \chi_i}{SG_i} \quad (5.4)$$

As declividades dos segmentos de reta, representadas pelas variáveis σ_i , ρ_i , ν_i e μ_i ($i = 1, 2, \dots, n_g$), possuem valores iguais a 1,0 para σ_i e μ_i , e 1,2 para ρ_i e ν_i . As ponderações α_i da função objetivo possuem as mesmas equações e valores da programação quadrática, apresentada no item anterior. Assim, a função objetivo do problema de otimização tem a seguinte forma:

$$\begin{aligned}
F.O. = & 0,0004\Delta Pg_{1,1} + 0,0005\Delta Pg_{2,1} + 0,0005\Delta Pg_{3,1} + 0,0004\Delta Pg_{4,1} + 0,222\Delta Pg_{1,2} \\
& + 0,266\Delta Pg_{2,2} + 0,266\Delta Pg_{3,2} + 0,222\Delta Pg_{4,2} + 0,0011\Delta Pg_{1,3} + 0,0013\Delta Pg_{2,3} \\
& + 0,0013\Delta Pg_{3,3} + 0,0011\Delta Pg_{4,3} + 0,024\Delta Pg_{1,4} + 0,029\Delta Pg_{2,4} + 0,029\Delta Pg_{3,4} \\
& + 0,024\Delta Pg_{4,4} + 0,130\Delta Pg_{1,5} + 0,156\Delta Pg_{2,5} + 0,156\Delta Pg_{3,5} + 0,130\Delta Pg_{4,5} \\
& + 0,476\Delta Pg_{1,6} + 0,571\Delta Pg_{2,6} + 0,571\Delta Pg_{3,6} + 0,476\Delta Pg_{4,6} + 0,275\Delta Pg_{1,7} \\
& + 0,330\Delta Pg_{2,7} + 0,330\Delta Pg_{3,7} + 0,275\Delta Pg_{4,7} + 0,141\Delta Pg_{1,8} + 0,169\Delta Pg_{2,8} \\
& + 0,169\Delta Pg_{3,8} + 0,141\Delta Pg_{4,8} + 0,211\Delta Pg_{1,9} + 0,253\Delta Pg_{2,9} + 0,253\Delta Pg_{3,9} \\
& + 0,211\Delta Pg_{4,9} + 0,152\Delta Pg_{1,10} + 0,182\Delta Pg_{2,10} + 0,182\Delta Pg_{3,10} + 0,152\Delta Pg_{4,10}
\end{aligned}$$

Restrições de estabilidade transitória:

- $\sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \leq \Delta Pm_{s,k,2}$, para $k \in C_1$;
- $\Delta Pm_{s,k,2} \leq \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \leq \Delta Pm_{s,k,1}$, para $k \in C_2$ e
- $\eta_k^o + S_{k,Pms_k} \sum_{i=1}^{n_g} \Gamma_{k,i} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) \geq \eta_{\min}$, para $k \in C_3$.

Utilizando os valores da Tabela 5.4, para as contingências críticas, obtém-se:

$$\begin{aligned}
-\Delta Pg_{1,1} - \Delta Pg_{2,1} + \Delta Pg_{3,1} + \Delta Pg_{4,1} &\leq -1,365 \\
-\Delta Pg_{1,1} - \Delta Pg_{2,1} + \Delta Pg_{3,1} + \Delta Pg_{4,1} &\leq -0,435 \\
-\Delta Pg_{1,3} - \Delta Pg_{2,3} + \Delta Pg_{3,3} + \Delta Pg_{4,3} &\leq -0,076
\end{aligned}$$

Restrições de limitações dos geradores:

$$\begin{aligned}
0 \leq \Delta Pg_{1i} \leq \Delta Pg_{\max 1} & \quad 0 \leq \Delta Pg_{3i} \leq \Delta Pg_{\min 1} \\
0 \leq \Delta Pg_{2i} \leq \Delta Pg_{\max 2} & \quad 0 \leq \Delta Pg_{4i} \leq \Delta Pg_{\min 2}
\end{aligned} \tag{5.5}$$

onde:

$$\begin{aligned}
\Delta Pg_i^{\min 1} &\triangleq \lambda (P_{\max i} - Pg_i^o) & \Delta Pg_i^{\max 1} &\triangleq \lambda (Pg_i^o - P_{\min i}) \\
\Delta Pg_i^{\min 2} &\triangleq (1 - \lambda) (P_{\max i} - Pg_i^o) & \Delta Pg_i^{\max 2} &\triangleq (1 - \lambda) (Pg_i^o - P_{\min i})
\end{aligned} \tag{5.6}$$

A variável λ representa a porcentagem de potência ativa de cada segmento da função objetivo e foi adotado o valor 0,5. Utilizando este valor e os valores da Tabela 5.3, encontra-se:

$$\begin{array}{lll}
 0 \leq \Delta Pg_{1,1} \leq 6,25 & 0 \leq \Delta Pg_{1,2} \leq 1,08 & 0 \leq \Delta Pg_{1,3} \leq 5,05 \\
 0 \leq \Delta Pg_{2,1} \leq 6,25 & 0 \leq \Delta Pg_{2,2} \leq 1,08 & 0 \leq \Delta Pg_{2,3} \leq 5,05 \\
 0 \leq \Delta Pg_{3,1} \leq 3,05 & 0 \leq \Delta Pg_{3,2} \leq 0,23 & 0 \leq \Delta Pg_{3,3} \leq 0,05 \\
 0 \leq \Delta Pg_{4,1} \leq 3,05 & 0 \leq \Delta Pg_{4,2} \leq 0,23 & 0 \leq \Delta Pg_{4,3} \leq 0,05 \\
 \\
 0 \leq \Delta Pg_{1,4} \leq 7,25 & 0 \leq \Delta Pg_{1,5} \leq 6,63 & 0 \leq \Delta Pg_{1,6} \leq 0,15 \\
 0 \leq \Delta Pg_{2,4} \leq 7,25 & 0 \leq \Delta Pg_{2,5} \leq 6,63 & 0 \leq \Delta Pg_{2,6} \leq 0,15 \\
 0 \leq \Delta Pg_{3,4} \leq 2,05 & 0 \leq \Delta Pg_{3,5} \leq 0,39 & 0 \leq \Delta Pg_{3,6} \leq 0,11 \\
 0 \leq \Delta Pg_{4,4} \leq 2,05 & 0 \leq \Delta Pg_{4,5} \leq 0,39 & 0 \leq \Delta Pg_{4,6} \leq 0,11 \\
 \\
 0 \leq \Delta Pg_{1,7} \leq 0,20 & 0 \leq \Delta Pg_{1,8} \leq 0,21 & 0 \leq \Delta Pg_{1,9} \leq 6,78 \\
 0 \leq \Delta Pg_{2,7} \leq 0,20 & 0 \leq \Delta Pg_{2,8} \leq 0,21 & 0 \leq \Delta Pg_{2,9} \leq 6,78 \\
 0 \leq \Delta Pg_{3,7} \leq 0,18 & 0 \leq \Delta Pg_{3,8} \leq 0,36 & 0 \leq \Delta Pg_{3,9} \leq 0,24 \\
 0 \leq \Delta Pg_{4,7} \leq 0,18 & 0 \leq \Delta Pg_{4,8} \leq 0,36 & 0 \leq \Delta Pg_{4,9} \leq 0,24 \\
 \\
 0 \leq \Delta Pg_{1,10} \leq 2,45 & & \\
 0 \leq \Delta Pg_{2,10} \leq 2,45 & & \\
 0 \leq \Delta Pg_{3,10} \leq 0,33 & & \\
 0 \leq \Delta Pg_{4,10} \leq 0,33 & &
 \end{array}$$

Restrições de balanço de potência:

Para a equação de restrição do balanço de potência ativa do sistema, tem-se:

$$\sum_{i=1}^{10} (\Delta Pg_{1i} + \Delta Pg_{2i} - \Delta Pg_{3i} - \Delta Pg_{4i}) = 0$$

Com esta última equação de restrição, o problema de otimização, para a programação linear, fica completo e sua solução representa os valores de redespachos para a primeira iteração. Todo o processo iterativo descrito no item anterior é repetido até o sistema alcançar a margem de segurança especificada ou até alcançar o número máximo de iterações.

Os valores de potência ativa, em MW, dos redespacho obtidos para a primeira iteração e para as demais, bem como os valores de geração realocada no redespacho e por iteração, são apresentados na tabela a seguir.

Tabela 5.6 Redespachos obtidos para o Sistema Sul utilizando programação linear

Gerador	1ª iteração	2ª iteração	3ª iteração	4ª iteração	5ª iteração	Total
1	-136,48	-64,12	-21,11	-7,74	-3,15	-232,60
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-7,56	-2,98	-0,24	-1,29	-0,49	-12,56
4	144,04	67,10	21,35	9,03	3,64	245,16
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total	144,04	67,10	21,35	9,03	3,64	245,16

Observa-se das Tabelas 5.5 e 5.6 que a resolução do problema da melhoria da segurança dinâmica por programação linear resulta em alteração da geração de um número relativamente pequeno de máquinas. Esta característica é vantajosa do ponto de vista operacional. O mesmo não ocorra na programação quadrática devido as características não-lineares dos termos da função objetivo, que tende a penalizar valores de redespacho maiores, levando a uma quantidade maior de máquinas com geração alterada. Este fato levou a uma nova simulação da metodologia desenvolvida com programação quadrática, considerando disponível para o redespacho apenas as máquinas que tiveram sua geração alterada na metodologia com programação linear, ou seja, os geradores 1, 3 e 4. Os resultados obtidos foram precisamente os mesmos encontrados na Tabela 5.6.

Observando as equações apresentadas, verifica-se que o problema de otimização possui um número pequeno de equações de restrições. Isto se deve a formulação do problema considerando-se uma equação de restrição de estabilidade para cada contingência crítica do sistema, sendo este número pequeno comparado com o número total de contingências.

5.6. Resultados Numéricos – Fase 2

Nesta fase são apresentados os resultados das metodologias desenvolvidas quando aplicadas aos quatro sistemas elétricos de testes e é feito uma avaliação comparativa com metodologias desenvolvidas anteriormente: o ACUCSO para a pior contingência e o ACUCSO simultâneo. São analisados os seguintes índices de desempenho:

- margens finais de estabilidade das contingências;
- quantidade total de geração realocada entre as máquinas;
- número de máquinas síncronas com geração de potência ativa alterada;
- desempenho computacional.

Os índices serão analisados individualmente nos próximos sub-itens.

5.6.1. Margens finais de estabilidade

Com o objetivo de melhorar a segurança do sistema, é feita a correção da segurança dinâmica através do redespacho de potência ativa entre as máquinas, visando aumentar as margens de estabilidade das contingências críticas do sistema até que estas sejam superiores ou iguais a margem mínima especificada. Foi considerada como margem mínima para os Sistema Sul, Sistema 730 e Sistema 2000 a margem de segurança de 0,30 e para o Sistema 188 a margem de segurança de 0,70. Nas Figuras 5.1 a 5.4 serão apresentados o valor inicial e os valores finais das margens das 10 primeiras contingências mais severas de cada sistema, para cada metodologia escolhida.

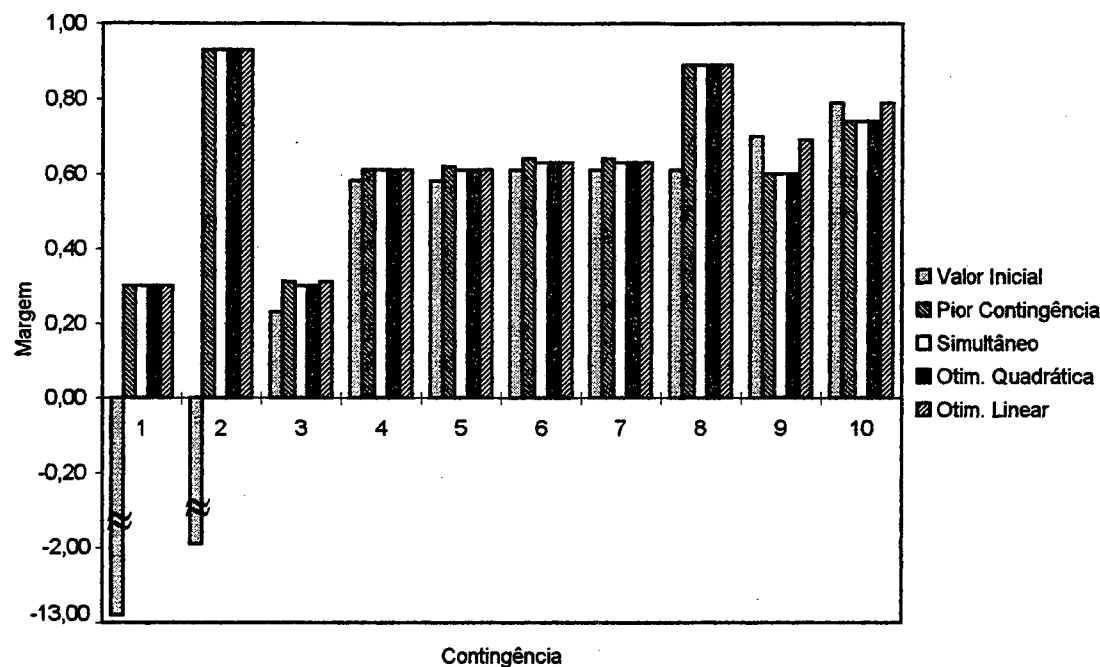


Figura 5.1 Margens finais do Sistema Sul

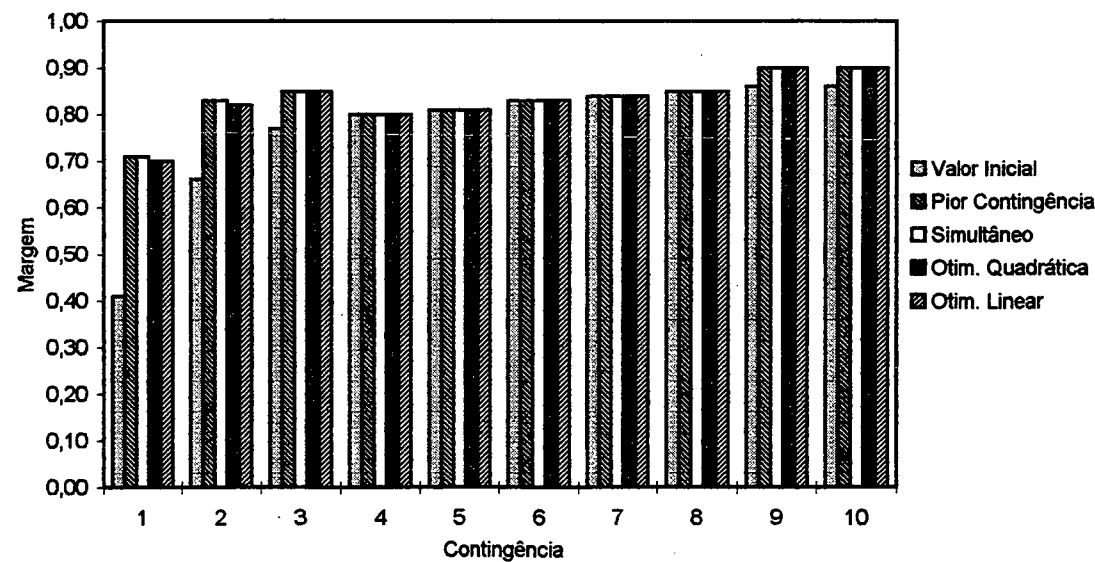


Figura 5.2 Margens finais do Sistema 188

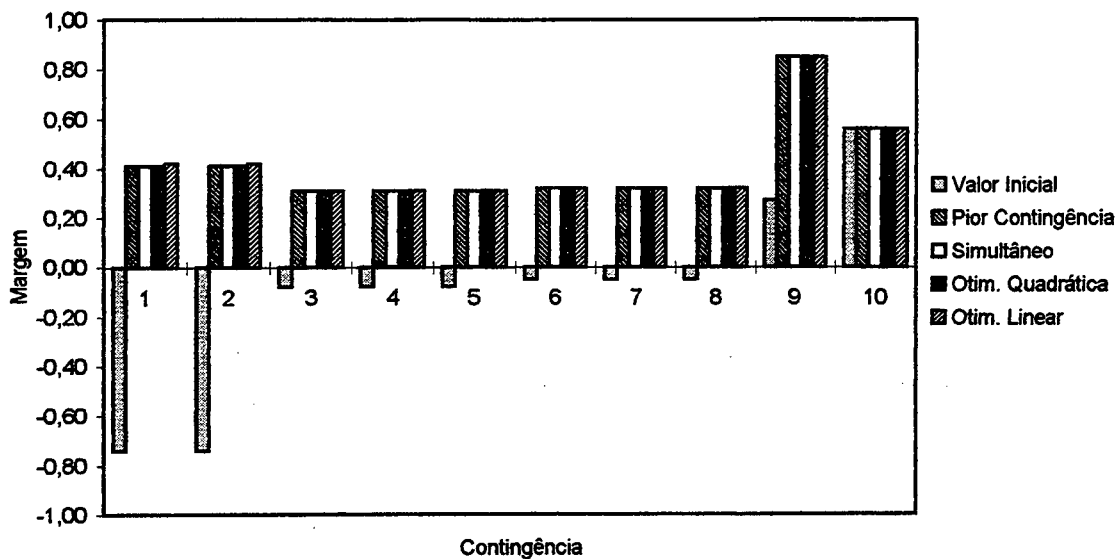


Figura 5.3 Margens finais do Sistema 730

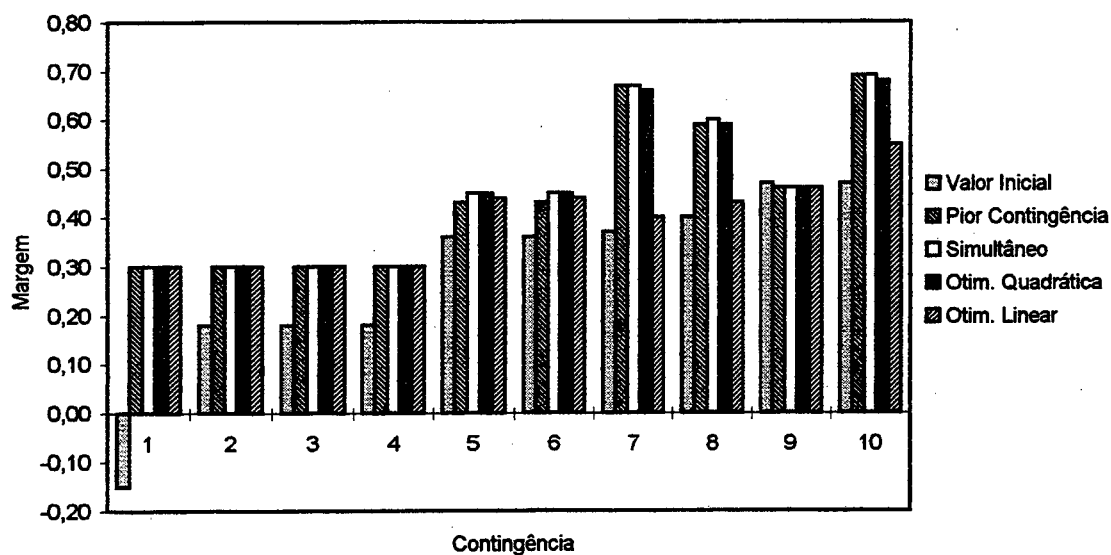


Figura 5.4 Margens finais do Sistema 2000

Observando as Figuras 5.1 a 5.4, percebe-se que para as quatro metodologias o sistema ficou mais seguro, alcançado assim a margem mínima especificada em todas as contingências críticas, mesmo nos casos mais severos, como apresentado na Figura 5.1. Esses resultados mostram a efetividade das metodologias propostas neste trabalho para a melhoria da segurança dinâmica de SEP.

Na Figura 5.4 observa-se que em determinadas contingências a margem final obtida pelo redespacho por otimização, utilizando programação linear, foi menor que as margens obtidas utilizando as outras metodologias. Isto se deve a um redespacho significativamente menor para a programação linear com relação aos redespachos obtidos pelas outras metodologias.

5.6.2. Geração realocada

Na Tabela 5.7 encontram-se os valores de potência ativa, em MW, que foram realocadas entre as máquinas síncronas, para cada uma das quatro metodologias, e o número de iterações que foram necessárias para que todas as contingências críticas atingissem a margem mínima especificada.

Tabela 5.7 Redespachos obtidos para cada sistema teste

Sistemas Elétricos	Métodos Heurísticos				Métodos de Otimização			
	Pior Contingência		Simultâneo		Programação Quadrática		Programação Linear	
	Nº de iter.	Geração realocada	Nº de iter.	Geração realocada	Nº de iter.	Geração realocada	Nº de iter.	Geração realocada
Sistema Sul	8	250,20	5	246,20	6	247,44	5	245,16
Sistema 188	7	32,44	7	32,37	10	30,80	10	30,77
Sistema 730	5	202,71	5	203,19	5	202,71	5	200,77
Sistema 2000	8	315,60	5	311,94	4	308,86	4	273,85

A partir da Tabela 5.7 pode-se observar que:

- Os valores de redespachos obtidos por otimização utilizando programação linear foram sempre os menores encontrados. Os maiores redespachos foram obtidos para o redespacho utilizando a pior contingência ou simultâneo;
- Os melhores valores em termos de número total de iterações e potência ativa realocada foram obtidos nos sistemas maiores.
- O ganho obtido utilizando a programação linear no Sistema 2000 foi de 42 MW comparado com o redespacho obtido utilizando o algoritmo para a pior contingência.

Este ganho mostra o que foi mencionado no item anterior, onde pode-se observar, na Figura 5.4, que as margens finais obtidas com o redespacho por otimização utilizando a programação linear tiveram valores iguais ou menores que os valores finais de margem obtidos pelas outras metodologias, mas sempre maiores que a margem mínima especificada.

5.6.3. Máquinas com geração alterada

Na Tabela 5.8 é apresentado o número total de máquinas síncronas disponíveis para o redespacho e o número de máquinas que tiveram sua geração alterada para o sistema atingir a margem de segurança especificada, considerando os quatro sistemas testes.

Tabela 5.8 Número de máquinas com geração alterada

Sistemas Elétricos	Nº total de Máquinas	Métodos de Solução do ACUCSO			
		Pior Contingência	Simultâneo	Programação Quadrática	Programação Linear
Sistema Sul	10	10	10	10	3
Sistema 188	15	14	14	14	2
Sistema 730	73	60	60	60	3
Sistema 2000	108	87	87	87	4

Nesta tabela observa-se uma grande vantagem do ponto de vista operacional, em se utilizar a metodologia baseada em programação linear. O número de máquinas síncronas com geração alterada, para este tipo de redespacho, é muito pequeno. Pode-se dizer que a programação linear utiliza o mínimo de máquinas possíveis para que o sistema atinja a margem de segurança especificada. Isto se deve a forma da função objetivo do problema de otimização linear, onde grandes variações em poucas máquinas tornam-se menos relevantes do que pequenas variações em um número maior de máquinas. O mesmo não ocorre nas outras metodologias, as quais utilizaram o mesmo número de máquinas nos estudos apresentados para fazer o redespacho.

5.6.4. Desempenho computacional

Neste item são apresentados os tempos de CPU despendidos para os programas computacionais de análise da estabilidade e identificação e quantificação das ações de controle. O tempo computacional utilizado pelo programa de fluxo de potência foi desprezado por ser muito pequeno em relação aos demais. Estes três programas são executados dentro de um laço onde trocam informações entre si através de arquivos. Futuramente serão integrados melhorando assim os tempos computacionais obtidos. Todas as simulações foram realizadas em uma estação de trabalho IBM Power PC RISC System/6000 de 200 MHz.

Os tempos apresentados nas Figuras 5.5 a 5.8 são os tempos totais utilizados na fase de análise da estabilidade e na fase de identificação e quantificação das ações de controle, necessários para levar o sistema a margem de segurança especificada, para as quatro metodologias utilizadas.

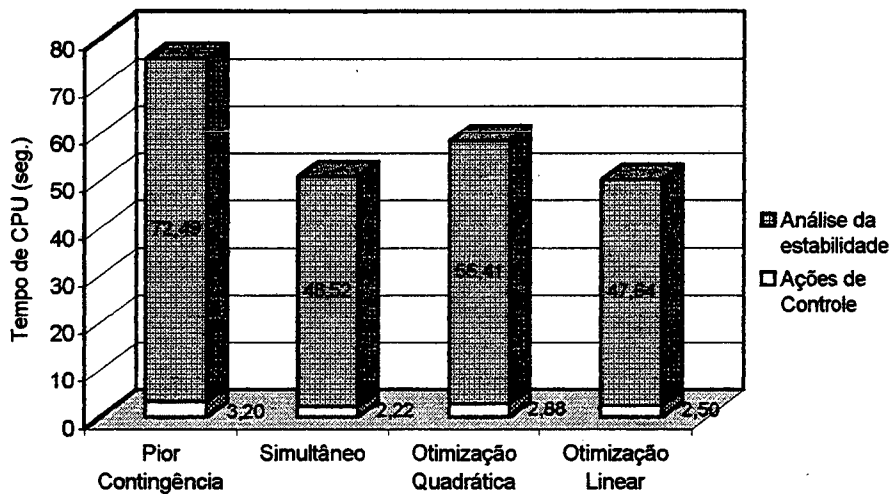


Figura 5.5 Tempo total de CPU para o Sistema Sul

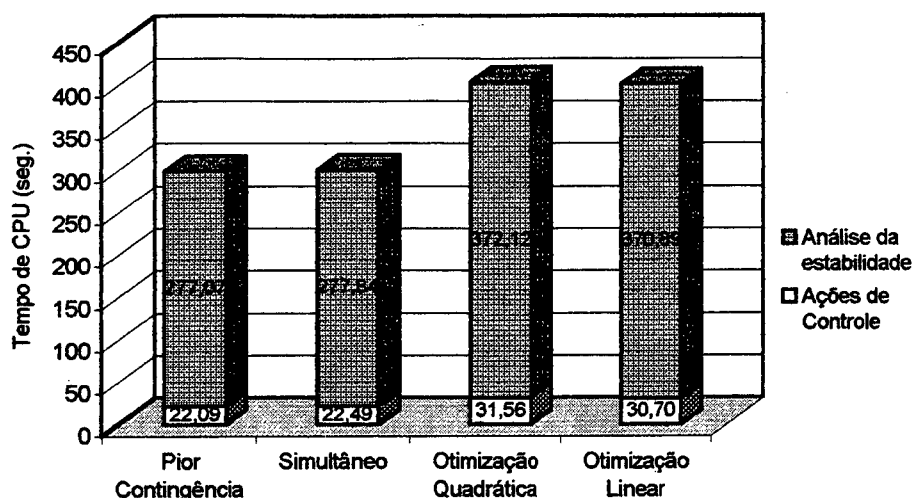


Figura 5.6 Tempo total de CPU para o Sistema 188

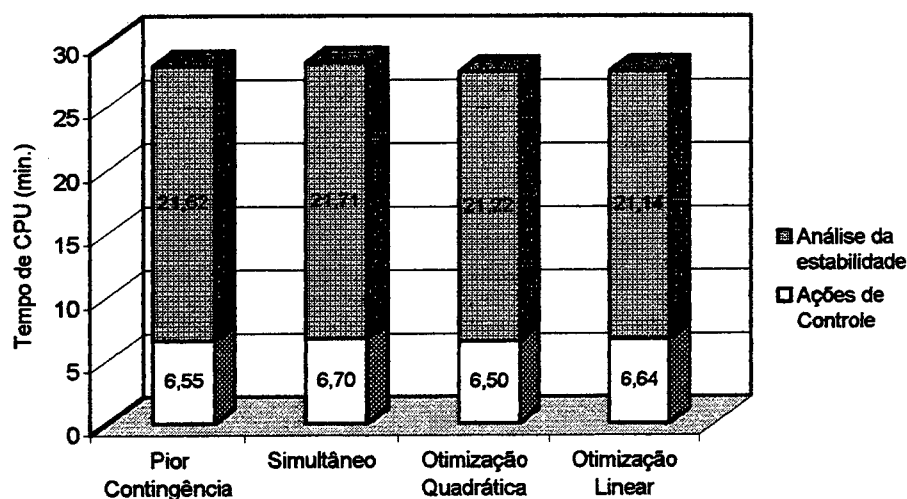


Figura 5.7 Tempo total de CPU para o Sistema 730

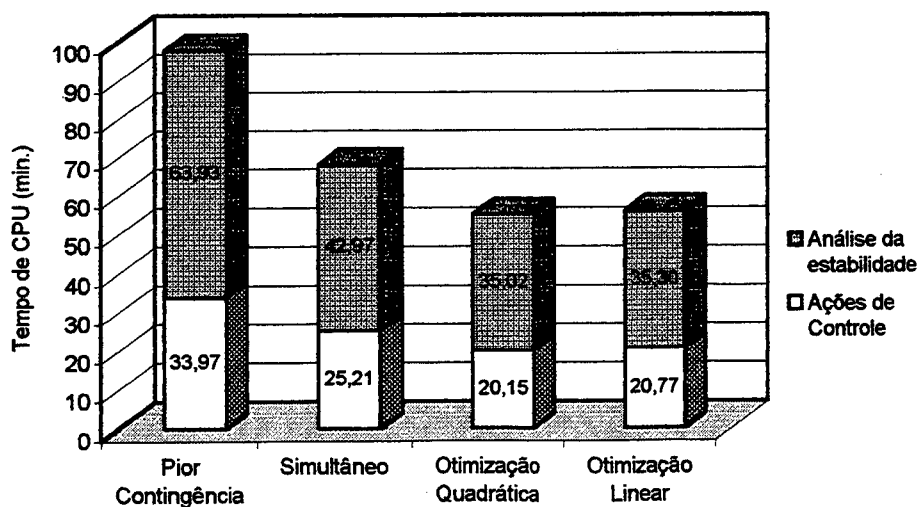


Figura 5.8 Tempo total de CPU para o Sistema 2000

A partir das Figuras 5.5 a 5.8 pode-se observar que:

- O tempo computacional total obtido realizando o redespacho por otimização com programação quadrática e linear é menor para sistemas maiores, comprovando novamente que a otimização tem um desempenho melhor em sistemas maiores;
- O maior consumo de tempo se deve ao programa de análise da estabilidade do sistema, que por estar com uma precisão de 99% para a tolerância de convergência em energia, faz com que o tempo de processamento por contingência fique 80% maior comparado com o tempo utilizado com tolerância de convergência de 90%, que é mais usualmente utilizada. Esta tolerância foi escolhida com o objetivo de encontrar resultados mais precisos, não importando o tempo despendido para isto. Atualmente, além da utilização do processamento paralelo, diversas técnicas estão sendo implementadas para a redução do tempo de CPU na análise da estabilidade e na definição das ações de controle. Contudo, nenhuma delas foi utilizada nos resultados apresentados.
- Com o crescimento da dimensão dos sistemas, o aumento do tempo utilizado pela identificação e quantificação das ações de controle foi maior que o aumento de tempo utilizado para a análise da estabilidade. Pode-se dizer que este aumento foi três vezes maior que o aumento de tempo da fase de análise da estabilidade.

Com o objetivo de entender o motivo do grande aumento de tempo, foram feitas simulações utilizando o redespacho por otimização com programação linear, onde foram medidos os tempos das etapas principais da fase de identificação e quantificação das ações de controle. Estas etapas são:

- cálculo da matriz Y reduzida para as configurações antes, durante e depois do defeito;
- cálculo do OMIB estático;
- cálculo OMIB dinâmico;
- cálculo das ações de controle.

Todos os tempos encontrados são referentes apenas a primeira iteração, sendo apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 Tempo (seg.) das etapas principais da fase de identificação e quantificação das ações de controle

	Sistema Sul	Sistema 188	Sistema 730	Sistema 2000
Matriz Y reduzida	0,23	2,19	29,80	128,62
OMIB Estático	0,06	0,23	0,95	10,21
OMIB Dinâmico	0,10	0,15	33,25	104,86
Problema de Otimização	0,02	0,04	0,11	0,13

Percebe-se, verificando os valores da Tabela 5.9, que o grande aumento de tempo ocorreu na etapa de cálculo da matriz Y reduzida para as configurações antes, durante e depois do defeito e na etapa de cálculo do OMIB dinâmico. Na primeira etapa este aumento é consequência do esforço computacional utilizado na redução do sistema às barras internas de geração. Este esforço é bem maior em sistemas maiores, já que a matriz reduzida terá um número de elementos igual ao quadrado do número de máquinas do sistema. Já na segunda etapa, o aumento de tempo se deve ao esforço computacional utilizado para recalcular os parâmetros do OMIB durante o transitório, os quais são renovados em cada subintervalos dos períodos de integração durante e depois do defeito. Atualmente, uma nova metodologia está sendo desenvolvida para a obtenção do OMIB diretamente das trajetórias calculadas pelo SLEP.

A fim de se analisar o aumento de tempo computacional relacionado com o aumento do número de contingências, foram simulados casos com 50, 100, 150 e 200 contingências. Os testes foram realizados considerando o redespacho por otimização com programação linear. Os tempos obtidos são apresentados nas quatro figuras a seguir.

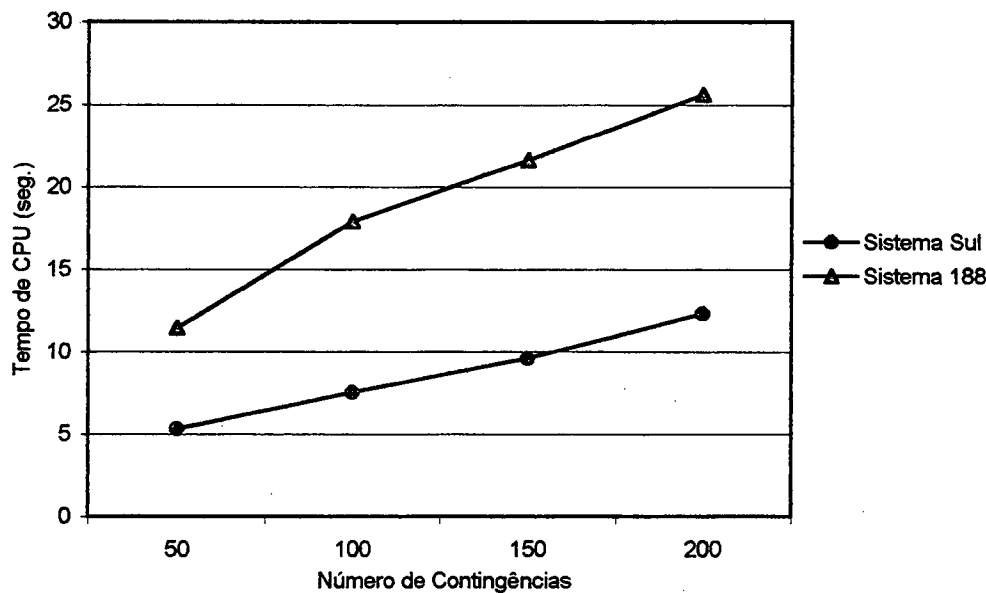


Figura 5.9 Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de análise da estabilidade

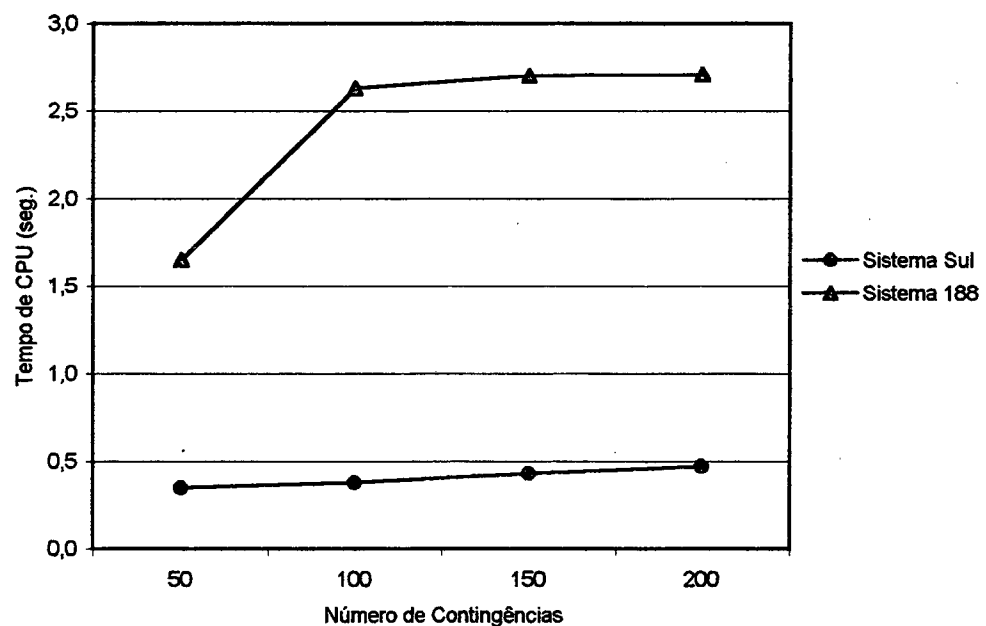


Figura 5.10 Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de identificação e quantificação das ações de controle

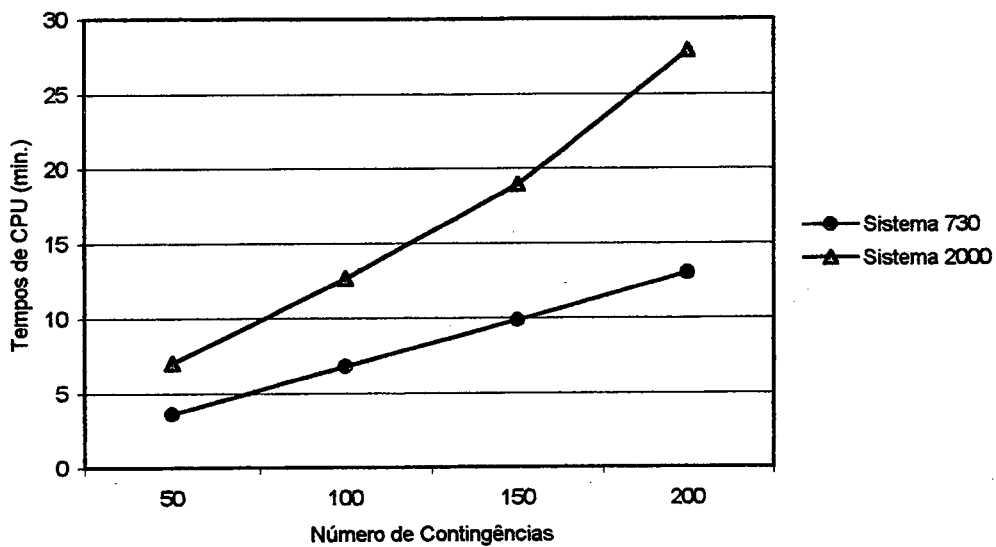


Figura 5.11 Tempos utilizados da 1ª iteração na fase de análise da estabilidade

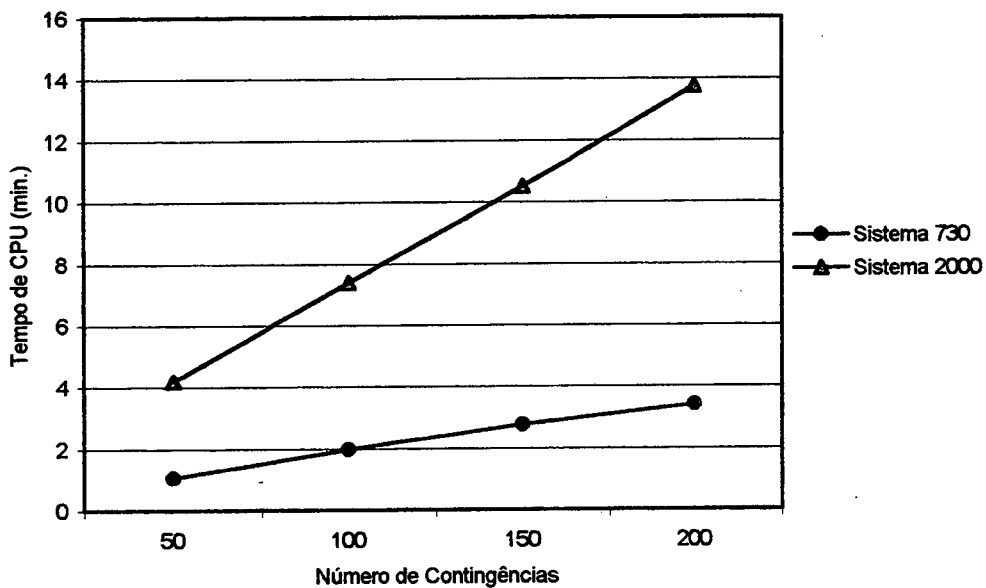


Figura 5.12 Tempos utilizados na 1ª iteração na fase de identificação e quantificação das ações de controle

Verifica-se que, na maioria dos casos, o aumento do tempo com o aumento do número de contingências, apresenta-se como uma função quase linear, tanto para a fase de análise da estabilidade quanto para a fase de identificação e quantificação das ações de controle. Isto não se verifica comparando o aumento do tempo com o aumento da dimensão do sistema, para um mesmo número de contingências.

5.7. Comentários

Neste capítulo foram apresentados e analisados os resultados obtidos com as quatro metodologias utilizadas na identificação e quantificação das ações de controle. Das quatro metodologias avaliadas, duas envolvem a solução do problema da melhoria da segurança dinâmica, formulado como um problema de otimização, utilizando métodos heurísticos e as outras duas, implementadas neste trabalho, envolvem a solução deste mesmo problema utilizando técnicas de otimização. As simulações foram feitas considerando perturbações do tipo curto-circuito trifásico sólido eliminado pelo desligamento de uma linha de transmissão ou transformador. A partir dos resultados foi possível avaliar a efetividade e o desempenho computacional dos algoritmos implementados e compará-los com os dois algoritmos desenvolvidos anteriormente utilizando heurística.

Analisando os valores das margens finais de segurança das contingências dos sistemas teste, pode-se verificar que a quantificação das ações de controle utilizando técnicas de otimização leva o sistema para a margem de segurança especificada, obedecendo todas as restrições impostas no problema de otimização.

Em sistemas maiores os novos algoritmos mostraram ser bem mais eficientes, em todos os aspectos, que nos sistemas menores, comparados com o ACUCSO para a pior contingência e ACUCSO simultâneo. Em todos os testes realizados, o redespacho por otimização utilizando a programação linear mostrou-se ser o método que utiliza o menor número de máquinas para a realocação de geração e a menor quantidade de geração realocada. Isto faz que com um menor valor de geração realocada, o sistema vá para um novo ponto de operação em que as contingências não possuam margem menor que a margem mínima de segurança especificada, alterando a geração inicial de apenas algumas máquinas.

A única desvantagem verificada foi o grande tempo computacional despendido para a realização das simulações, tanto para os algoritmos utilizando heurística quanto para os algoritmos utilizando as técnicas de otimização. Mas, como foi mencionado anteriormente, atualmente existem várias técnicas para reduzir os altos

tempos de processamento utilizados nos programas, resolvendo assim o problema de grande consumo de tempo.

Constatou-se neste capítulo que os desempenhos alcançados pelos novos algoritmos desenvolvidos foram totalmente satisfatórios, abrangendo todos os critérios estabelecidos para um redespacho de potência ativa. Novas melhorias podem ser feitas objetivando diminuir o tempo computacional, tornando assim a metodologia mais rápida e mais adequada as necessidades dos sistemas de gerência de energia.

CAPÍTULO 6

Conclusão

6.1. Introdução

O objetivo deste trabalho foi desenvolver uma metodologia para resolver o problema da melhoria da segurança dinâmica utilizando técnicas de otimização. O problema de programação não-linear proposto em [1] foi reformulado para os modelos de programação quadrática e linear, alterando tanto a função objetivo quanto as equações de restrições. Nas soluções foram utilizados uma aproximação do método simplex para o problema de programação quadrática e o método dos pontos interiores para o problema de programação linear. As implementações computacionais foram realizadas utilizando o programa ACUCSO desenvolvido em [1] e a biblioteca de sub-rotinas de otimização OSL da IBM.

Nas simulações foram utilizados quatro sistemas elétricos, sendo que dois são de grande porte. Foram analisadas todas as contingências simples possíveis nos sistemas de pequeno porte e as 50 contingências simples mais severas nos sistemas de grande porte. A partir dos resultados obtidos, pode-se comparar o desempenho das novas metodologias desenvolvidas com as metodologias desenvolvidas anteriormente utilizando heurística: o ACUCSO para a pior contingência e o ACUCSO simultâneo.

A seguir são apresentadas as conclusões gerais obtidas da avaliação realizada com as novas metodologias implementadas, as contribuições do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

6.2. Conclusões Gerais

As principais conclusões do trabalho são apresentadas a seguir e organizadas segundo o desempenho metodológico propriamente dito e segundo o desempenho computacional.

Desempenho Metodológico:

- As novas metodologias satisfazem as condições para a melhoria da segurança dinâmica, pois aumentam as margens de segurança das contingências críticas do sistema, levando-o para um novo ponto de operação no qual a margem de segurança especificada é alcançada.
- A metodologia para a melhoria da segurança dinâmica, utilizando programação linear, obteve os menores valores de quantidade de geração realocada e número de máquinas com geração inicial alterada. A programação linear utiliza uma quantidade menor de redespacho de potência ativa, alterando um número reduzido de máquinas, para levar o sistema a margem de segurança mínima especificada.
- As metodologias implementadas tiveram um melhor desempenho em sistemas de grande porte, principalmente a programação linear.

Desempenho Computacional:

- O maior consumo de tempo foi obtido na fase de análise da segurança dinâmica do sistema.
- Para o aumento do tempo comparado com o aumento do número de contingências, a metodologia apresentou resultados, na maioria dos casos, proporcionais considerando simulações em um mesmo sistema. O mesmo não aconteceu comparando o aumento do tempo com o aumento da dimensão dos sistemas, para um mesmo número de contingências.
- Na identificação e quantificação das ações de controle, os maiores tempos foram obtidos nas fases de cálculo da matriz Y reduzida para as configurações antes, durante e depois da falta e cálculo do OMIB equivalente dinâmico.

Considerando todos os aspectos dos resultados, verificou-se que a metodologia satisfaz todos os critérios estabelecidos para a melhoria da segurança dinâmica, obtendo bons valores de índices de desempenho. Com relação ao tempo despendido nas simulações, atualmente, além da utilização do processamento paralelo, diversas técnicas estão sendo implementadas para a redução do tempo de CPU na análise da estabilidade e na definição das ações de controle. O uso de algumas destas técnicas resultaria em melhor desempenho computacional.

6.3. Contribuições do Trabalho

As principais contribuições do trabalho foram:

- Formulação do problema de melhoria da segurança dinâmica como um problema de programação linear e programação quadrática;
- Uso de técnicas de otimização na quantificação das ações de controle para a melhoria da segurança dinâmica, utilizando uma aproximação do método simplex para a solução por programação quadrática e o método dos pontos interiores para a solução por programação linear;
- Implementação da metodologia desenvolvida utilizando o programa ACUCSO e as sub-rotinas de otimização da IBM - OSL;
- Avaliação da metodologia em quatro sistemas elétricos de potência, sendo dois de grande porte.

6.4. Propostas para Trabalhos Futuros

No sentido de dar continuidade e possibilitar a melhoria da metodologia desenvolvida neste trabalho, são apresentadas as seguintes sugestões:

- Implementar a metodologia desenvolvida em ambiente computacional paralelo;
- Estudar a inclusão das restrições de estabilidade, tal como formuladas, em problemas de fluxo de potência ótimo;
- Utilizar técnicas de programação não-linear para a solução do problema de otimização, formulado em [1];
- Formular o problema de otimização para considerar ações de controle do tipo redespacho de geração ativa e reativa;
- Estudar a formulação do problema da melhoria da segurança dinâmica incluindo modelagem mais detalhada do sistema;
- Integrar os 3 módulos computacionais utilizados na metodologia: fluxo de potência, análise da estabilidade e ações de controle.

APÊNDICE A

A Biblioteca de Otimização da IBM - OSL

A.1. Introdução

A OSL - Optimization Subroutine Library [18], é uma coleção de sub-rotinas matemáticas da IBM, de alta performance, para uso em programas que resolvam problemas de otimização, onde se deseja minimizar ou maximizar uma função sujeita a um conjunto de restrições. Em busca de um menor tempo de processamento, as sub-rotinas da OSL foram todas implementadas em linguagem FORTRAN, porém podem ser utilizadas em programas feitos em linguagem C, FORTRAN, PL/I ou APL2. As sub-rotinas da OSL resolvem problemas de otimização formulados como problemas de programação linear (PL), programação inteira-mista (PIM) ou programação quadrática (QP).

O alto nível de suas sub-rotinas prove uma grande capacidade para solucionar problemas de otimização, necessitando ao usuário apenas detalhes de conhecimento de programação matemática. São fáceis de serem utilizadas, possuindo numerosos parâmetros de controle de variáveis.

A OSL pode ser utilizada em diversos sistemas operacionais. Nos próximos sub-itens serão mencionados estes sistemas operacionais e analisados mais detalhadamente as características da OSL na solução utilizando programação linear, inteira-mista e quadrática.

A.2. Sistemas operacionais

Flexibilidade é também uma das vantagens pela variedade de sistemas operacionais suportados pela OSL. Pode ser executada em doze diferentes sistemas operacionais:

- Três sistemas operacionais da IBM: MVS, VM e AIX/ESA;
- Cinco sistemas operacionais em estações de trabalho: AIX, HP-UX, IRIX, SunOS e Solaris;
- Quatro sistemas operacionais de PC: DOS, OS/2, Windows e Windows NT.

Uma aplicação OSL desenvolvida em um ambiente pode ser executada em outro, sem grandes alterações.

A.3. Sub-rotinas de programação linear

A OSL oferece, em suas sub-rotinas de programação linear, os métodos simplex, pontos interiores e fluxo em redes na solução dos problemas de otimização. No método simplex estão disponíveis os algoritmos primal e dual. Na solução pelo método dos pontos interiores pode-se usar o método “barrier” primal ou primal-dual e no fluxo em redes utiliza-se uma versão do método simplex, que proporciona uma especial vantagem na forma da matriz de restrições da rede.

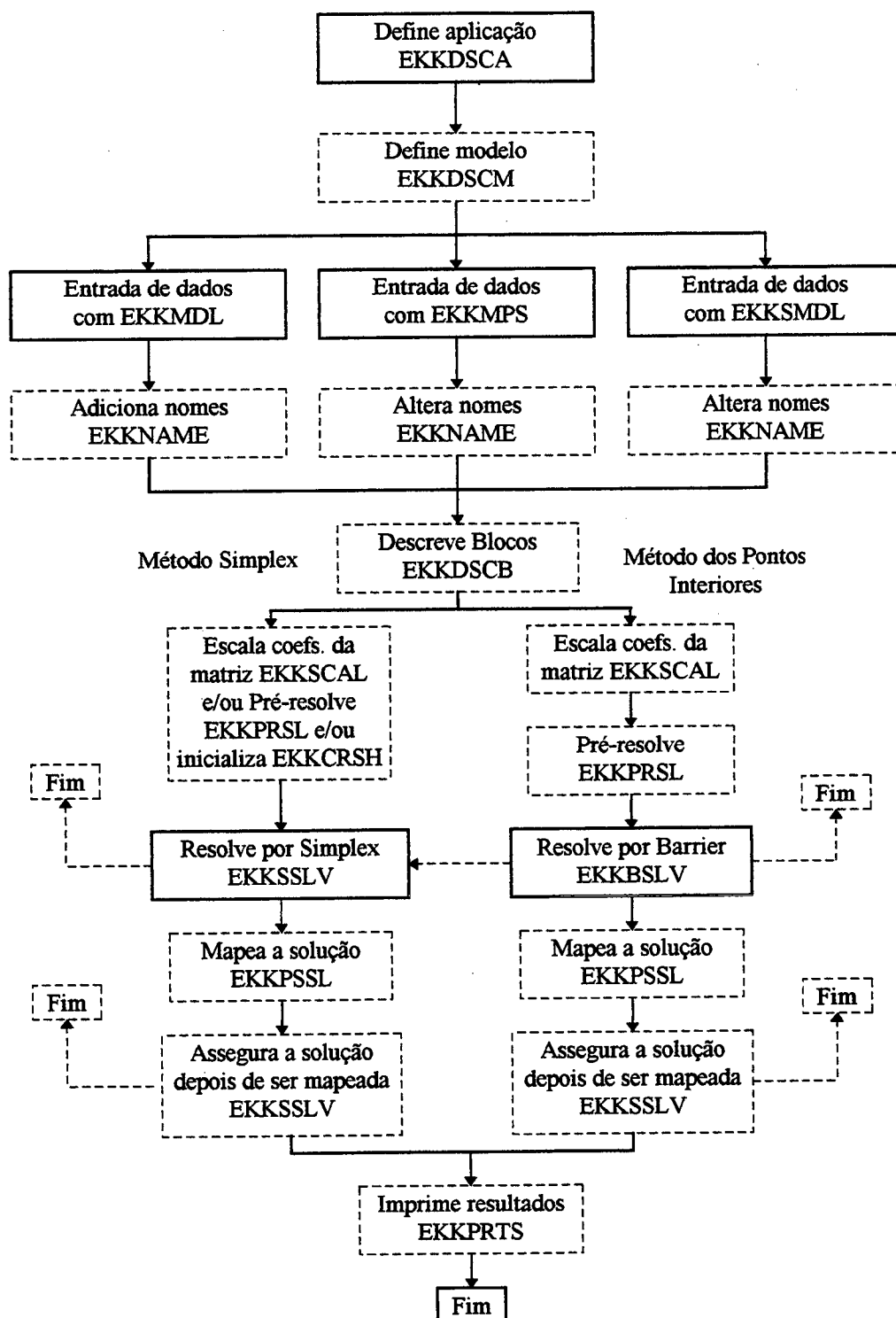


Figura A.1 Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Linear

A OSL também dispõe de programação de análise de sensibilidade e paramétrica na programação linear, que pode ser utilizada na análise dos efeitos causados nas alterações supostas na solução. A análise de sensibilidade permite determinar, para cada variável, um valor máximo de custo que mantém a solução ótima. Para cada restrição e variável, o máximo valor para manter os limites inferior e superior na solução ótima determinada. A análise paramétrica permite investigar alterações em grupo de variáveis e restrições simultaneamente. Possuem uma grande flexibilidade, já que um grande número de alternativas podem ser consideradas em uma única chamada da sub-rotina da OSL.

Um fluxograma de uma exemplo de aplicação da OSL em programação linear pode ser visto na Figura A.1. Os blocos com linhas contínuas representam as sub-rotinas obrigatórias e os com linhas pontilhadas as opcionais.

A.4. Sub-rotinas de programação inteira-mista

Um problema de programação inteira-mista é um problema de programação linear em que algumas das variáveis devem ser inteiras. Muitas vezes são modeladas para receberem apenas valores iguais a 0 ou 1. Para este tipo de programação a OSL dispõe de uma solução pelo método “branch-and-bound”, utilizando ou não um preprocessor (pré-análise). Este preprocessor reduz o tamanho inicial da árvore do “branch-and-bound” por efetuar uma análise baseada na estrutura 0-1 do problema. Dentre os procedimentos efetuados nesta análise, pode-se destacar os seguintes:

- faz uma análise da matriz do problema e dos limites das variáveis, declarando, se necessário, a impossibilidade de solução;
- usa uma aproximação heurística para atribuir os valores “0” ou “1” nas variáveis 0-1. Isto é feito para determinar se a solução pode ser obtida;

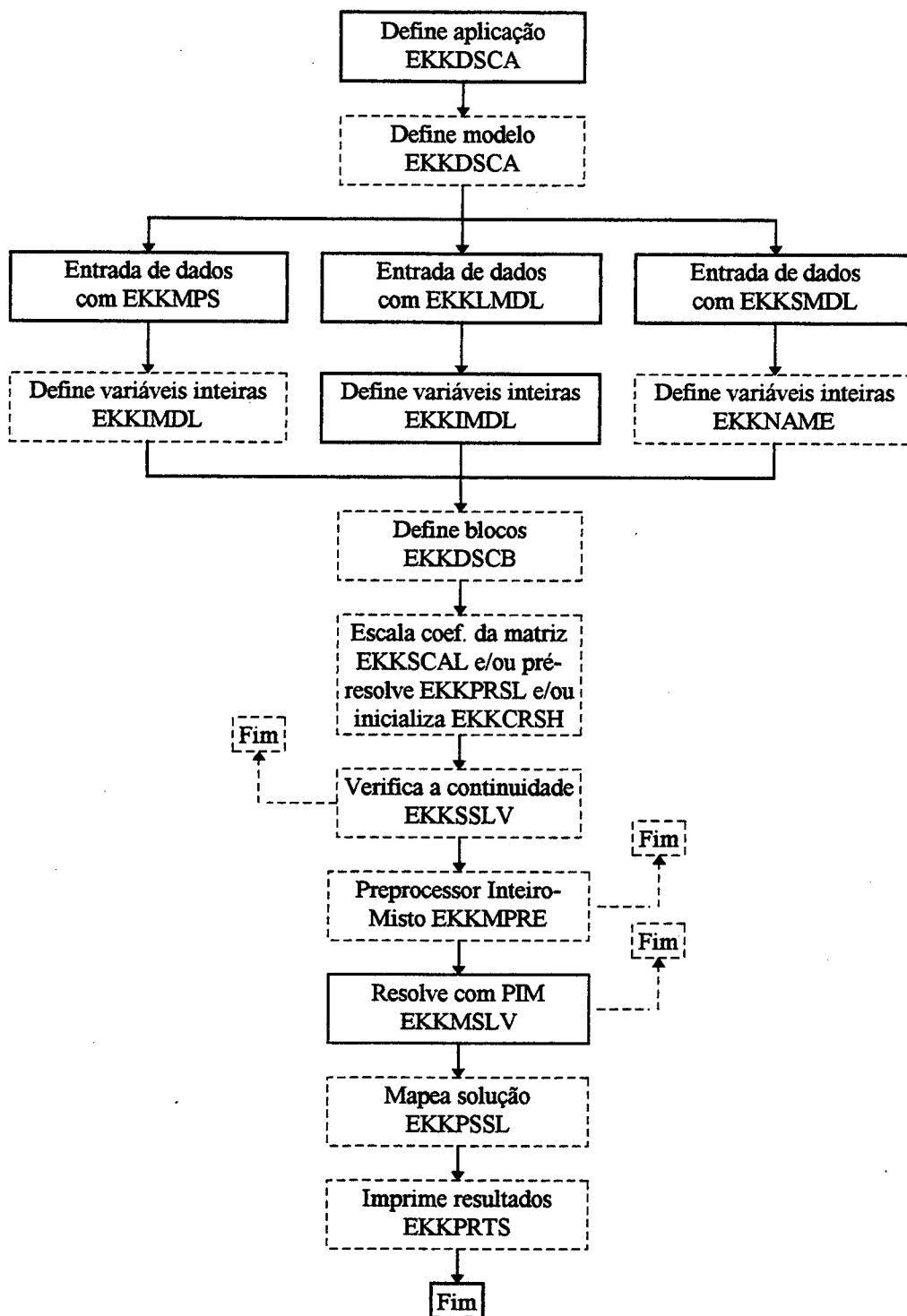


Figura A.2 Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Inteira-Mista

- fixa cada variável 0-1 primeiro em “0” e depois em “1” e determina as consequências com as outras variáveis. Em alguns casos, mostra que é impossível encontrar solução para uma variável.

Um fluxograma de uma exemplo de aplicação da OSL em programação inteira-mista pode ser visto na Figura A.2. Como no fluxograma exemplo de programação linear, os blocos com linhas contínuas representam as sub-rotinas obrigatórias e os com linhas pontilhadas as opcionais.

A.5. Sub-rotinas de programação quadrática

A OSL considera para a programação quadrática uma função objetivo quadrática convexa com restrições lineares, onde a matriz de coeficientes quadrática é positiva-semidefinida.

A OSL usa uma aproximação do método simplex, utilizando um algoritmo rápido e robusto em dois estágios para minimizar a função objetivo. Já que o ponto ótimo deve ocorrer no interior da região viável, o método simplex não pode ser usado sozinho para resolver problemas de programação quadrática. O primeiro sub-algoritmo resolve um problema linear aproximado, e um simples problema quadrático em cada interação. Quando aproximações sucessivas estão próximas o suficiente, o segundo sub-algoritmo é utilizado. Esta extensão do método simplex permite uma função objetivo quadrática e converge mais rapidamente dado um bom valor inicial. A OSL também inclui uma sub-rotina para resolver problemas de programação quadrática paramétrica.

A Figura A.3 mostra um fluxograma de uma exemplo de aplicação da OSL em programação quadrática. Os blocos com linhas contínuas representam as sub-rotinas obrigatórias e os com linhas pontilhadas as opcionais.

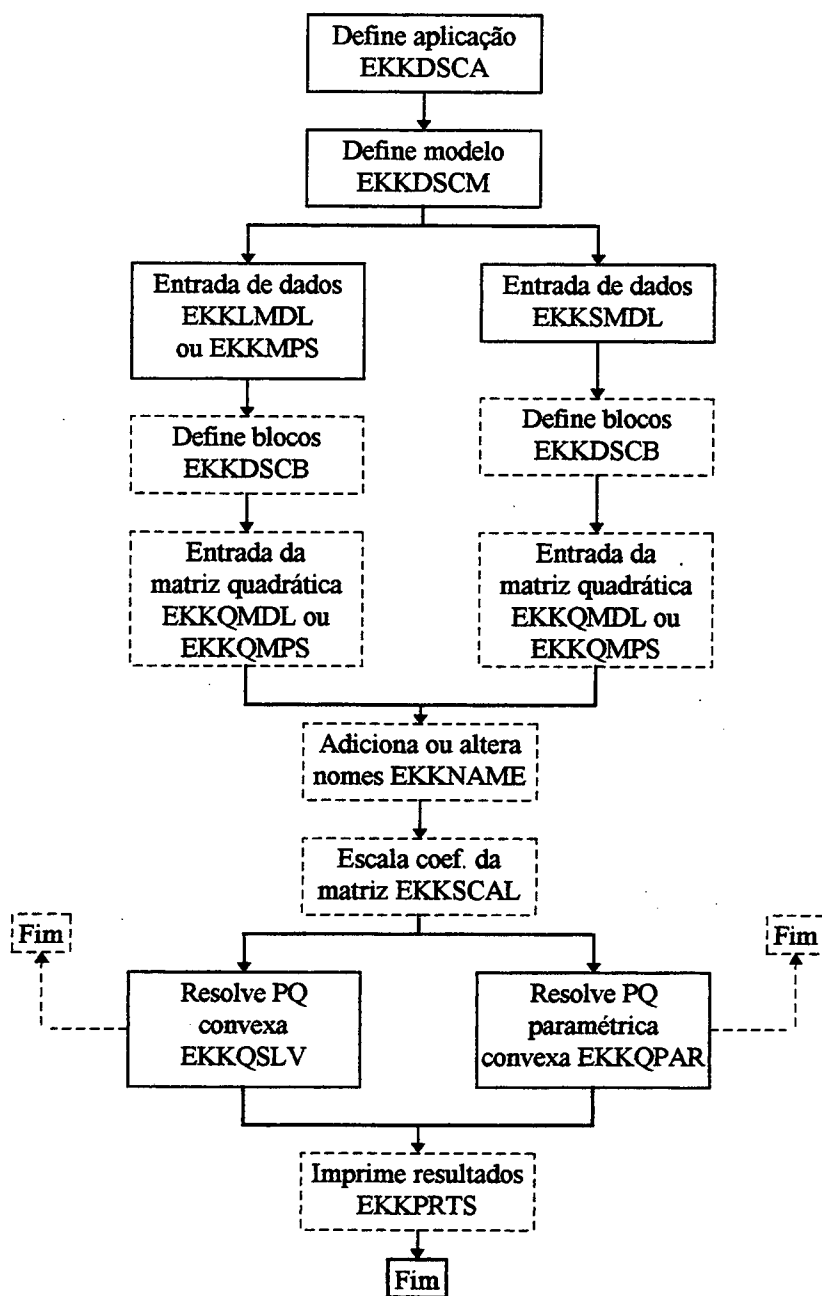


Figura A.3 Fluxograma exemplo de uma aplicação da OSL: Programação Quadrática

A.6. A OSL paralela - OSLp

A OSLp - Parallel Optimization Subroutine Library [2] é um conjunto de sub-rotinas que inclui toda a capacidade da OSL serial, além do adicional benefício de resolver problemas de otimização linear e inteira-mista, utilizando técnicas de processamento paralelo.

As sub-rotinas da OSL paralela possuem também todas as características da OSL seqüencial, podendo ser acessadas por programas feitos em linguagem FORTRAN, C ou C++.

A.6.1. Benefícios do uso da OSLp

A OSLp oferece os seguintes benefícios:

- **Aumento de performance.** Em geral, a OSLp resolve grandes problemas de otimização mais rápido que se fossem executados em ambiente serial.
- **Resolução de grandes problemas.** A OSLp pode trabalhar com grandes problemas e maior número de dados do que a OSL em ambiente serial.
- **Facilidade no uso.** Algumas características que facilitam o seu uso:
 - Todas as características e capacidades da OSL serial estão disponíveis na OSLp;
 - Não é necessário ter conhecimento de como trabalhar com códigos de programação paralela para usar a OSLp. Com pequenas alterações nos programas seriais, pode-se executá-los em ambiente paralelo.
 - As chamadas das sub-rotinas da OSLp são compatíveis com as chamadas de sub-rotinas da OSL serial, facilitando a adaptação de programas já existentes no modo serial.

A.6.2. Sistemas operacionais

Para executar uma aplicação da OSLp é necessário o sistema operacional AIX versão 3.2.5, ou subsequente, para uma estação de trabalho IBM Power PC RISC System/6000.

A.6.3. Software de comunicação

A OSLp necessita dos seguintes software de comunicação, variando em função do hardware utilizado.

- **Computadores paralelos IBM/SP**
 - IBM AIX Parallel Environment (PE);
 - IBM AIX Parallel Virtual Machine Extended (AIX PVMe);
 - Parallel Virtual Machine (PVM);
- **Estações de trabalho RISC System/6000**
 - IBM AIX Parallel Environment (PE);
 - Parallel Virtual Machine (PVM).

A.6.4. Terminologia do processamento paralelo

No próximo sub-item será feita uma abordagem das sub-rotinas da OSLp, mas para melhor entendimento, abaixo estão citadas as definições dos termos de processamento paralelo que serão utilizados.

“Speed-up”: é a razão entre o tempo necessário para o algoritmo seqüencial executar determinado processamento pelo tempo utilizado pelo correspondente algoritmo adaptado para uma máquina paralela. Quanto maior o “speed-up”, melhor é o desempenho do algoritmo no processamento paralelo.

Granularidade: é a relação entre a quantidade de processamento executado em uma tarefa paralela e a quantidade de comunicação entre elas. A granularidade pode ser medida a nível de máquinas paralelas e dos algoritmos desenvolvidos. Máquinas paralelas de granularidade grossa são aquelas em que esta relação é alta, onde a máquina possui pouca capacidade de comunicação, apesar de alta capacidade de processamento; quando o contrário acontece e esta relação é baixa, a máquina é dita ser de granularidade fina. Os algoritmos com granularidade grossa são aqueles com tarefas grandes que podem ser processadas independentemente em paralelo e os com granularidade fina são os com tarefas pequenas a serem processadas em paralelo. Quanto menor a granularidade, maior a dificuldade de se obter altos “speed-ups”.

Latência: a latência de comunicação é definida como o tempo necessário para dois processadores se conectarem e estarem aptos para a troca de dados entre si.

Largura de Banda: é a velocidade de transferência de dados.

A.6.5. Estrutura das sub-rotinas da OSLp

Toda capacidade da OSL serial está disponível na OSL paralela, sendo que algumas sub-rotinas foram reescritas para serem utilizadas em ambiente paralelo. Estas incluem duas sub-rotinas de métodos de solução de problemas de otimização, duas de entrada e saída de transferência de dados entre os processadores e duas sub-rotinas de acesso e modificação de variáveis de controle inteiras. Em adicional, novas variáveis de controle inteiras foram acrescentadas.

As sub-rotinas de acesso e modificação de variáveis de controle inteiras inicializam e terminam o processamento paralelo. Este controle de variáveis pode assumir diferentes valores em diferentes processadores. São estas variáveis que controlam o processamento paralelo, definindo quantos processadores estão sendo utilizados, qual é o processador mestre e quais são os escravos.

As sub-rotinas de transferência de dados (sub-rotinas I/O) podem ser utilizadas em uma aplicação serial, ou podem ser utilizadas para passar as informações do

modelo do processador mestre para os escravos em um ambiente paralelo. Elas criam e recebem mensagens passadas entre aplicações OSLp processadas por PVM ou PE. São responsáveis pela alta velocidade de transferência de dados entre os processadores.

Na nova sub-rotina de programação inteira-mista, um algoritmo “branch-and-bound” paralelo de granularidade grossa compartilha o trabalho de investigação da árvore do “branch-and-bound” entre os multiprocessadores. Se a quantidade de dados para transferência for razoavelmente pequena, pode-se ter um bom “speed-up” paralelo mesmo quando a largura de banda e latência da rede não são boas.

A nova sub-rotina de programação linear possui uma paralelização de granularidade fina onde o método de pontos interiores é utilizado para resolver grandes problemas de programação linear em multiprocessadores. Esta nova sub-rotina paralela, diferencia da paralela de programação inteira-mista em dois grandes aspectos. Primeiro, o “speed-up” adquirido é mais influenciado pela largura de banda (e em menor extensão, pela latência) da rede, do que na de programação inteira-mista. Segundo, esta sub-rotina paralela é formada por um algoritmo simétrico em que todos os processadores possuem trabalho similar e usam aproximadamente a mesma quantidade de tempo de CPU.

Se o número avaliado de processadores é menor que o número de processos escravos requerido, a OSLp tenta iniciar um processo escravo no processador em que o processo mestre está executando. Esta tentativa pode falhar, dependendo do ambiente operacional paralelo utilizado. Se isto falhar, o processamento paralelo não é inicializado. Iniciar um processo escravo no processador em que o mestre está executando é um modo de operação recomendado quando utiliza-se a OSLp com PVM e quando o número de processadores é pequeno (16 ou menor). Isto é utilizado somente para resolver problemas de programação inteira-mista.

BIBLIOGRAFIA

- [1] GOMES CASTRO, J. E. - "Metodologia para o Estudo da Segurança Dinâmica de Sistemas de Energia Elétrica usando os Métodos SLEP Iterativo e das Áreas Iguais Estendido" - Dissertação de Mestrado - EEL - UFSC - Agosto de 1995.
- [2] IBM - "Parallel Optimization Subroutine Library" - User's Guide, Release 1, June 1994.
- [3] XUE, Y., CUTSEM, T.V. and PAVELLA, M.R. - "A Simple Direct Method for Fast Transient Stability Assessment of Large Power Systems" - 87 WM 104-3 IEEE/PES Winter Meeting - N.Orleans - 1987
- [4] XUE, Y., PAVELLA, M. "Extended Equal-Area Criterion : An Analytical Ultra-Fast Method for Transient Stability Assessment and Preventive Control of Power Systems" - Electrical Power & Energy Systems Vol. 11 Nº 2, pp. 131-149 April 1989.
- [5] XUE, Y. - "Real-Time Analytic Sensitivity Method for Transient Security Assessment and Preventive Control" - IEEE PROCEEDINGS, Vol. 135, Pt. C, Nº 2, March 1988.
- [6] XUE, Y., WEHENKEL, L., BELHOMME, R. et alli - "Extended Equal Area Criterion Revisited" - IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 7, Nº 3, August 1992.
- [7] XUE, Y., ROUSSEAU, P., GAO, Z., BELHOMME, R., EUXIBIE, E. and HEILBRONN, B. - "Dynamic Extended Equal Area Criterion. Part 1 : Basic Formulation; Part 2 : Embedding Fast Valving and Automatic Voltage Regulation" IEEE/NTUA Athens Power Tech Conference, Athens, Greece, Sept. 5-8, 1993.

- [8] XUE, Y. and PAVELLA, M. - "Critical-Cluster Identification in Transient Stability Studies" - IEE PROCEEDINGS-C, Vol. 140, Nº 6, November 1993.
- [9] XUE, Y. "Extended Equal Area Criterion : Foundations and Applications" - Artigo apresentado na IV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica - Foz de Iguaçu - Brasil - Maio de 1994.
- [10] PROGRAMA SLEPM - Manual do Usuário - Adendo UFSC/CEPEL – v.96.
- [11] FONSECA, L.G.S. and DECKER, I.C - "Iterative Algorithm for Critical Energy Determination in Transient Stability of Power Systems" Artigo apresentado no IFAC Symposium Planning & Operation Electric Energy Systems - Rio de Janeiro - Julho de 1985.
- [12] FONSECA, L.G.S. , DECKER, I.C. e PEDROSO, A.S. - "Métodos de Análise de Estabilidade Transitoria - Estudo Comparativo" - Artigo apresentado no Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belém do Pará - Brasil - Setembro de 1990.
- [13] CIGRE - "Task Force Report, Assessment of Practical Fast Transient Stability Methods" (Convener S. Greves) June 1992.
- [14] MINUSSI, C.R. - "Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica" - Tese de Doutorado - EEL - UFSC - Florianópolis - Novembro de 1990.
- [15] SALGADO, R. - "Otimização Estática Aplicada a Sistemas de Potência" - Apostilas - UFSC CTC - Grupo de Sistemas de Potência - Junho de 1995.
- [16] DECKER, C. I. - "Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência Usando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial" - Dissertação de Mestrado - EEL - UFSC - Florianópolis - Outubro de 1984.

- [17]CARVALHO, M. F.; SOARES, S. and OHISHI, T. - "Optimal Active Power Dispatch by Network Flow Approach" - IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3, Nº 4, November 1988.
- [18]IBM - "Optimization Subroutine Library: Guide and Reference" - Release 2.1, February 1995.
- [19]BAZARAA, M. S. and SHETTY, C. M. - "Nonlinear Programming - Teory and Algorithms" - John Wiley & Sons, Inc. - 1979.
- [20]OPOKU, G. - "Optimal Power System Var Planning" - IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, Nº 1 - February 1990.
- [21]STOTT, B. and MARINHO, J. L. - "Linear Programming for Power-System Network Security Applications" - IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-98, Nº 3, May/June 1979.
- [22]FONSECA, L.G.S. , PEDROSO, A.S. - "Correção de Segurança Dinâmica em Sistemas de Potência de Grande Porte Via Redespacho" - Artigo apresentado no Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belém do Pará - Brasil - Setembro de 1990.
- [23]FONSECA, L.G.S. , MINUSSI, C.R. - "Redespacho de Geração para Controle de Segurança Dinâmica em Sistemas de Energia Elétrica Através de Analise de Sensibilidade" - Artigo apresentado no Oitavo Congresso Brasileiro de Automática - Belém do Pará - Brasil - Setembro de 1990.
- [24]MONTROYA, D. N. - "Cálculo da Capacidade de Intercâmbio Simultâneo em Sistemas Interligados com Restrição de Estabilidade Transitória" - Dissertação de Mestrado - EEL - UFSC - Florianópolis - Julho de 1990.

- [25]ATHAY, T. , PODMORE, R. , VIRMANI, S. - "A Practical Method for the Direct Analysis of Transient Stability" - IEEE. Trans on Power Apparatus and Systems PAS-98 N° 2 March/April 1979.
- [26]FOUAD, A.A. , STANTON, S.E. - "Transient Stability Analysis a Multimachine Power Systems. Part I : Investigation of System Trajectory, and Part II : Critical Transient Energy" - IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems - Vol PAS 100 - pp 3408-3424 - 1981.
- [27]KAKIMOTO, N. , OHSAWA, Y. and HAYASHI, M. "Transient Stability Analysis of Electric Power System Via Lur'e Type Liapunov Function" - IEE of Japan, Vol. 98-E, N° 5/6, pp. 63-79, 1978.
- [28]MARIA, G., TANG, C., KIM, J., - "Hybrid Transient Stability Analysis" - IEEE Transaction On Power Systems, Vol. 5, N° 2, pp. 384-393, May 1990.
- [29]KUO, D., BOSE, A., - "A generation Reschedulling Method to Increase the Dynamic Security of Power Systems" - IEEE Transaction On Power Systems, Vol 10, N° 1, pp 68-76, February 1995.
- [30]MANSOUR, Y. et alli - "B. C. Hydro's On-line Transient Stability Assessment (TSA) Model Development, Analysis and Post-processing" - IEEE Transaction. on Power Systems, Vol 10, N° 1, pp 241-253, February 1995.
- [31]ZHANG, Y., WEHENKEL, L., ROUSSEAUX, P. and PAVELLA, M. - "SIME: A Hybrid Approach to Fast Transient Stability Assessment and Contingency Selection" - Electrical Power & Energy Systems, Vol. 19, N° 3, pp.195-208, 1997.
- [32]CASTRO, M. S. - "Análise On-Line da Estabilidade Transitória de Sistemas Elétricos de Potência Usando Computação Distribuída" - Dissertação de Mestrado - DSEE - UNICAMP - Setembro de 1995.

- [33]VAAHEDI, E. , MANSOUR, Y. , CHANG, A. Y. , CORNS, B. R. and TSE, E.K.
- "Enhanced Second Kick Methods for On-Line Dynamic Security Assessment" –
IEEE/PES Winter Meeting, January 21-25, 1996, Baltimore MD – 96 WM 264-2
PWRS..
- [34]OTA, H. et alli - "Development of Transient Stability Control System (TSC System)
Based on On-Line Stability Calculation" - IEEE Transaction on Power Systems,
Vol. 11, Nº 3, August 1996.
- [35]LA SCALA, M., TROVATO, M. and ANTONELLI, C. – "On-Line Dynamic
Preventive Control: An Algorithm For Transient Security Dispatch" – IEEE
Transactions On Power Systems, PE-610-PWRS-0-01-1997.
- [36]Task Force on Terms & Definitions – "Proposed Terms & Definitions for Power
System Stability" – IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.
PAS-101, Nº 7, July 1982.
- [37]BALU, N. et alli – "On-Line Power System Security Analysis" – Proceedings of the
IEEE, Vol. 80, Nº 2, February 1992.
- [38]LA SCALA, M. et alli – "A Tracking Time Domain Simulator for Real-Time
Transient Stability Analysis" – 13th Proceeding of Power Industry Computer
Application Conference (PICA'97), pp 295-301, May 11-16, Columbus (OH),
1997.
- [39]KUMAR, A. B. R. et alli – "Integrated Framework for Dynamic Security Analysis"
– 13th Proceeding of Power Industry Computer Application Conference (PICA'97),
pp 260-265, May 11-16, Columbus (OH),1997.
- [40]IEEE PES Working Group on Dynamic Security Assessment (Chairman: A. A.
FOUAD) – "Dynamic Security Assessment Practices in North America" – IEEE
Transactions on Power Systems, Vol. 3, Nº 3, August 1988.